

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta strojní**

**Katedra mechanické technologie**

# **Bakalářská práce**

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta strojní**

**Katedra mechanické technologie**

**Technologie výroby potrubních oblouků za tepla**

**Production Technology of Hot Bedding of Steel Tube**

**Student**

**Václav Hajtmar**

**Vedoucí bakalářské práce**

**prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc**

**Ostrava 2012**

## Zadání bakalářské práce

Student: **Václav Hajtmar**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie  
Téma: **Technologie výroby potrubních oblouků za tepla**  
**Production Technology of Hot Bending of Steel Tube**

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor technologií ohýbání trubek za tepla
2. Sestavení relace proměnných ohýbání trubek za tepla
3. Specifikace sil a momentů ohýbání trubek za tepla
4. Analýza parametrů ohybu trubek pro rozměrové a materiálové reprezentanty
5. Diskuze dosažených výsledků

Seznam doporučené odborné literatury:


BÁLEK, S. *Tepelne technické tabulky a diagramy*. Ostrava: VŠB, 1979, 137 s.  
ČÁBELKA, J. a kol. *Mechanická technológia*. Bratislava: VSAV, 1967. s. 594÷599  
STANGE, R. *Basic tube bending guide*. Denver: Tool for bending, Inc., 1963. p. 10  
SEMIATIN, S. L. a kol. *Metals Handbook Ninth Edition. Vol. 14, Forming and Forging*. Ohio, Metals Park: ASM International, 1998, p. 665÷674

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

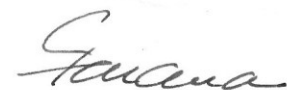
Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012

  
prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

**Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 21.5.2012.....

.....*Kajkmar*.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 21.5.2012.....

Hajtmar.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Václav Hajtmar

Adresa trvalého pobytu autora práce: Rudolfa Pavla 12, 789 01, Zábřeh

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

HAJTMAR, V. *Technologie výroby potrubních oblouků za tepla*. Ostrava: katedra mechanické technologie, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2012, 61 s. Bakalářská práce, vedoucí prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.

Bakalářská práce se zabývá ohýbáním trubek za tepla pro dva různé druhy oceli. V úvodní kapitole je popsáno ohýbání trubek a všechny důležité technologie a postupy, které využijeme při ohýbání trubek. V dalších kapitolách jsme sestavili relaci proměnných pro materiálové reprezentanty, zvláště upozornili na ztrátu kruhovitosti. Stanovili momenty a síly a pomocí softwaru Qform zjistili deformace síly a teploty potřebné pro ohýbání trubek za tepla.

## **ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

HAJTMAR, V. *Production Technology of Hot Bending of Steel Tube*. Ostrava: Department of Mechanical Technology, Faculty of Mechanical Engineering - Technical University of Ostrava, 2012, 61 p. Bachelor thesis, the supervisor prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc

This thesis deals with hot bending of tubes for two different types of steel. The introductory chapter describes the bending and all relevant technologies and procedures that will be used in tube bending. In subsequent chapters, we compiled a relation of variables for product representatives, particularly pointed to the loss of circularity. We determined moments and forces and using the software Qform we found deformations of strength and temperatures required for hot bending of tubes.

## Obsah:

Seznam použitého značení a zkratk	9
1. Úvod	11
2. Rozbor technologií ohýbání trubek za tepla	12
2.1 Vlastnosti trubek	13
2.2 Průběh pružných a plastických deformací	15
2.3 Zbytková pnutí, odpružení a ztenčení stěny	16
2.4 Momenty při ohýbání trubek	17
2.5 Ohýbání trubek za tepla	19
2.6 Dodávky vysokotlakého spojovacího potrubí – použití v praxi	24
2.7 Rozdělení tváření dle teploty	26
3. Sestavení relace proměnných ohýbání trubek za tepla	28
3.1 Vstupní data a nastavení stroje pro ohyb	28
3.2 Limity ohýbání trubek za tepla	29
3.3 Materiálové reprezentanti – popis, tenkostěnné trubky	33
3.4 Teplota ohřevu a rychlost posuvu	36
3.5 Přirozený přetvárný odpor	39
3.6 Výstupní parametry	40
4. Specifikace sil a momentů ohýbání trubek za tepla	41
4.1 Nastavení ohybové kladky	41
4.2 Rovnice pro ohybový moment a přítláčnou sílu vodících a ohybové kladky	41
5. Analýza parametrů ohybu trubek pro rozměrové a materiálové reprezentanty	43
5.1 QForm	43
5.2 Postup ohýbání trubek za tepla v programu QForm	43
5.3 Efektivní deformace	45
5.4 Přetvárný odpor	49
5.5 Teploty v průběhu ohýbání	50
5.6 Síly na jednotlivých nástrojích	52

6. Diskuze dosažených výsledku	57
7. Závěr	59
8. Seznam použité literatury	60



## Seznam použitého označení a zkratek

$R_v$  - vlákna na vnějším poloměru trubky

$R_m$  - vlákna na vnitřním poloměru trubky, mez pevnosti

$R_e$  - mez kluzu

$\sigma_d$  - tlakové napětí

$\sigma_t$  - tahové napětí

$\sigma_p$  - přetvárný odpor v průhybu

$W$  – modul odporu průřezu v ohybu

$d$  – vnitřní průměr kladky

$C$  – materiálová konstanta

$n$  - materiálová konstanta

$k$  – parametr, který se vyhodnocuje pomocí plastometrických měření

$a_1$  – délka mezi kladkami a induktorem

$a_2$  – vzdálenost mezi kladkami

$r_2$  – poloměr ohýbací kladky

$r_1$  - poloměr vodící kladky

$D$  – průměr trubky

$y$  – vzdálenost mezi kladkami pro nastavení velikosti oblouku

$L$  - vzdálenost

$W_o$  - průřezový modul trubky v ohybu

$\Delta r$  - průhyb prstence

$F$  - působící síla

$E$  - modul pružnosti

$J$  - moment setrvačnosti v průřezu

$F_{kl.v}$  - přítláčná síla vodících kladek

$F_{kl.o}$  - přítláčná síla ohýbací kladky

$M$  - moment

$M_o$  – ohybový moment

$e$  – deformace

$r$  – poloměr středního vlákna prstence

$b$  – šířka prstence

$o$ - odchylka kruhovitosti

$k$  – materiálový parametr

$\Delta r$  - průhyb prstence

## 1. Úvod:

Ohýbání je proces, kdy působením ohybového momentu dochází k trvalé změně materiálu. Ohýbání patří do oblasti plošného tváření.

Většinou se používá ohýbání za studena, ale tvrdé a křehké materiály s velkým průměrem se musejí ohýbat za tepla. Čas práce při ohýbání za studena je podstatně kratší než čas pro ohyb za tepla. Musíme totiž připočítat časy spojené s ohřevem u trubek s plněním písku atd. Režijní náklady ohýbání za tepla jsou podstatně vyšší, z důvodu spotřeby tepelné energie.

V první kapitole se seznámíme s ohýbáním trubek všeobecně a podíváme se na chování trubek při ohýbání a jejich vlastnosti. Nebude chybět ani použití velkých a rozměrných ohybů trubek v praxi, které bylo potřeba například při stavbě elektrárny Ledvice.

Ve druhé kapitole se podíváme na sestavení relací proměnných, to znamená, že si popíšeme vstupní parametry pro ohýbací stroj a popíšeme si chemické a mechanické vlastnosti pro materiálové reprezentanty, které budeme ohýbat (ocel 11523, 15128).

Ve třetí kapitole popíšeme momenty a síly potřebné k ohybu trubky a popíšeme rovnice potřebné pro výpočty ohýbacího stroje.

Ve čtvrté části budeme pomocí počítačového programu Qform zkoumat síly a deformace v průběhu ohýbání a další parametry důležité pro ohýbání trubek za tepla. V posledních bodech se podíváme na výsledky bakalářské práce a porovnáme je mezi sebou.

## **2. Rozbor technologií ohýbání trubek za tepla**

Jak již bylo zmíněno v úvodu, ohýbání trubek za tepla se používá z důvodů velkých a rozměrných ohýbaných oblouků, kvůli snížení přetvárných odporů a zamezení tak velkým a nežádoucích deformacím a změnám tvaru trubky [1].

Ohýbání je často používaná operace ve strojírenské výrobě. Ohýbání je velmi intenzivní přetvoření, které zasahuje malý objem součástky. Rozhodující činitel je pro něj napětí v tahu. Ohýbáním se zpracovávají plechy, dráty, trubky, profily atd. Je samozřejmou snahou každého výrobce použít ohýbání trubek zastudena. Vedou k tomu převážně finanční důvody [1].

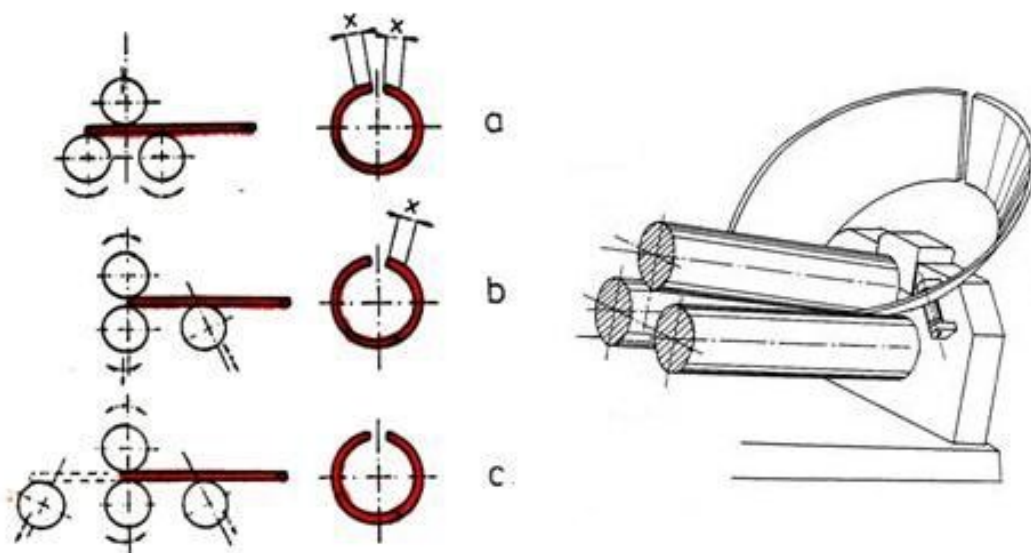
Protože se při ohýbání za tepla používají podobné technologie ohybu jako za studena, seznámíme se v úvodní kapitole s problematikou ohýbání všeobecně.

Rozdělení ohýbání: Prosté ohýbání, ohraňování, zkrucování, drábkování, lemování, navíjení atd. Nás se však tyto technologie přímo nedotýkají, nejbližší se k ohýbání trubek blíží zakružování [1].

### **Zakružování**

Zakružováním se nazývá stáčení plechu nebo profilového materiálu do kruhu nebo válcové či kuželové plochy apod. Z plechu tak vyrábíme pouzdra, trubky, násypky, válcové nádrže atd. Materiál se zakružuje do šroubovice, kruhu či spirály. Zakružováním se místo ohybu plynule posouvá po délce materiálu od jednoho konce k druhému, přičemž se zakřivení plynule zvětšuje na požadovanou hodnotu. Plechy do tloušťky 30-40 mm se zakružují za studena [3].

Pracovním ústrojím jsou u zakružovaček tvarové kotouče nebo válce. Podle jejich polohy dělíme zakružovačky na symetrické a nesymetrické. Málo zakroužený plech se má tendenci po zakroužení znovu narovnat. Po větším ponoření ohýbacího válce se docílí plastického zakroužení [3].



Obr. 1 Uspořádání zakružovaček (vlevo) a detail zakružování kužele (vpravo) [8]

a – tříválcová symetrická, b – tříválcová nesymetrická, c – čtyřválcová

## 2.1. Vlastnosti trubek

Trubky se využívají ve všech odvětvích průmyslu. Proto musí být na trhu dostatečně velký sortiment, pokud jde o rozměry a kvalitu materiálu. Kladené požadavky na trubky můžeme posuzovat z mnoha úhlů. Trubky jsou v praxi vystaveny mechanickému namáhání vnějšími silami, tlakem, tahem, smykem, ohybem, kroucením a kombinacemi těchto namáhání. Dále pak vnějším přetlakem a vnitřním namáháním. K tomu mohou být vystaveny tepelnému namáhání, které bývá způsobeno rozdílným tepelným stavem v objemu. K těmto účinkům pak i vlivy chemické [1].

Nejběžnějším materiálem pro výrobu trubek je ocel, protože splňuje většinu požadavků na trubky a je při svých vlastnostech finančně méně náročná. Při ohýbání trubek z jiných materiálů využíváme poznatky z ohýbání trubek z ocele [1].

Trubky můžeme také rozlišovat podle způsobu výroby:

- Trubky lité
- Trubky tvářené tlakem:

### *Kované*

- Válcované za tepla
- Rozšiřované za tepla
- Redukované za tepla

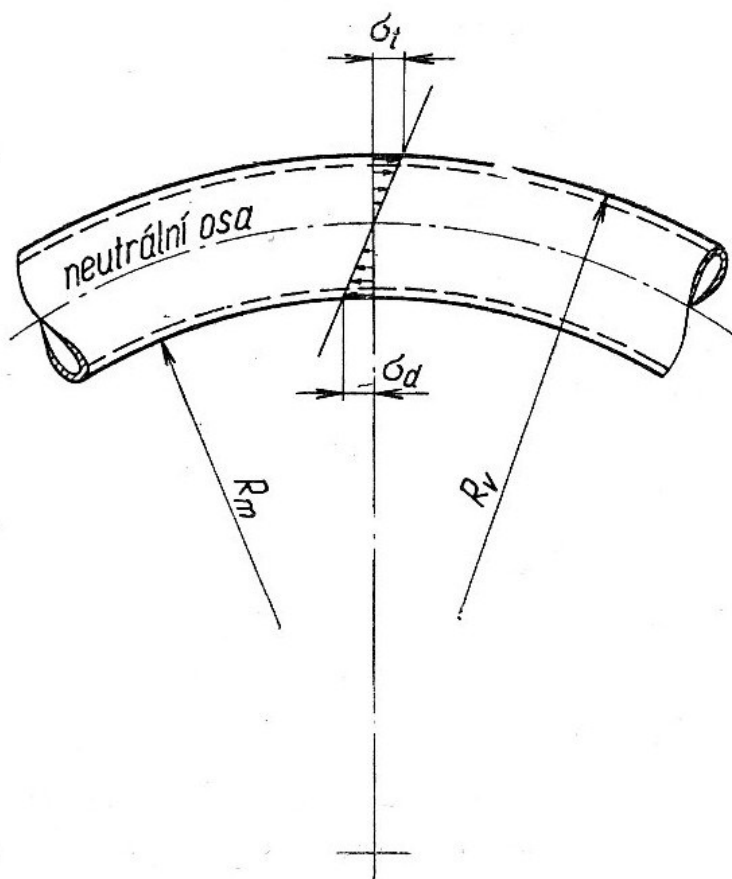
*Tažené za tepla* - vyrábí se normalizovaných i nenormalizovaných rozměrů i nekruhových tvarů

- Válcované za studena – zpravidla ze slitinových ocelí
- Tažené za studena – malých průměrů
- Trubky svařované – instalační trubky
- Svařované elektricky
- Odporem
- Vysokofrekvenční
- Obloukem – v ochranné atmosféře
- Pod tavidlem – spíš velkých průměrů.

Bezešvé ocelové trubky vyrábíme ze zhotoveného dutého polotovaru a z něj se vyrobí trubka redukcí tloušťky stěn, případně průměru na požadovaný rozměr [3].

## 2.2 Průběh pružných a plastických deformací

Namáháme-li trubku ohybovým momentem, dochází nejprve k pružnému ohybu, při kterém je rozložení v příčném řezu lineární. Krajiní vlákna na vnějším poloměru ( $R_v$ ) trubky jsou namáhána největším tahovým napětím, krajiní vlákna na vnitřním poloměru ( $R_m$ ) trubky jsou namáhána největším tlakovým napětím. Směrem k neutrální ose postupně klesají a teprve na neutrální ose jsou nulové. [1]



Obr. 2 Rozložení a velikost napětí v materiálu [1]

Tato neutrální osa při pružném ohybu nezmění svou délku a souhlasí s osou trubky. Při dalším ohýbání překročí napětí v krajiních vláknech mez kluzu a prodloužení se stále zvětšuje. Rovněž na tlačné straně dojde k trvalému stlačování. Tvářením za studena se materiál zpevňuje, a proto tedy napětí ve vláknech vzroste nad mez kluzu. Maximální hodnota napětí je v krajiních vláknech [1].

Materiál se na vnější straně ohybu protahuje a na vnitřní straně pěchuje. Proto nastane nerovnoměrné rozdělení materiálu v příčném řezu. Tloušťka stěny na vnější straně ohybu klesá a na vnitřní straně roste. Původní neutrální osa přestane být neutrální a roste v ní

tahové napětí. Nyní tedy nemluvíme o neutrální ose, ale o vláknech neprodloužených a nezkrácených [1].

## 2.3 Zbytková pnutí, odpružení a ztenčení stěny

Při odlehčení materiálu jsou některá vlákna trvale deformována a některá pružně. Vlákna trvale deformována brání vláknům pružně deformovaným zaujmout svou původní polohu a délku. Po ohýbání zůstává v materiálu **zbytkové pnutí**, které má vliv na pevnost ohnuté součásti. Zatížíme-li ji momentem ve stejném smyslu jak bylo při ohýbání, nastane plastická deformace, až hodnota momentu překročí hodnotu momentu při ohýbání [2].

**K odpružení** u materiálu dochází po ohnutí trubky, pomínou-li vnější síly na deformovaném tělese, těleso se částečně vrátí do své předchozí polohy. Odpružení se nám projevuje jako nežádoucí úhlová odchylka, jež je větší, čím delší máme rameno (trubku). Zpětné odpružení je způsobeno plastickou deformací materiálu kolem neutrální osy. Velikost odpružení závisí na tvárnosti ohýbaného materiálu, druhu ohýbání a poloměru ohybu. Odpružení se vyskytuje v drtivé většině u ohýbání materiálů zastudena [1][2].

Odpružení zamezujeme pomocí:

- Ohýbaný materiál ohneme více (o úhel odpružení), který určíme pomocí empirických vztahů a nebo z tabulek. Nástroj navrhujeme s korekcí o úhel odpružení [8].
- Použijeme kalibrace, to znamená, že na konci lisovacího procesu zvětšíme sílu, dojde k místní plastické deformaci v místě ohybu. Dojde ke zmenšení odpružení a nebo odpružení úplně zmizí [8].
- Vyztužíme místo ohybu žebry (u trubek se nepoužívá).

### Ztenčení stěny v místě ohybu.

Jeho velikost ovlivňuje:

- čím větší je úhel ohybu
- čím větší je tření mezi nástrojem a materiálem
- čím méně je materiál tvárný



- čím menší je poloměr ohybu.

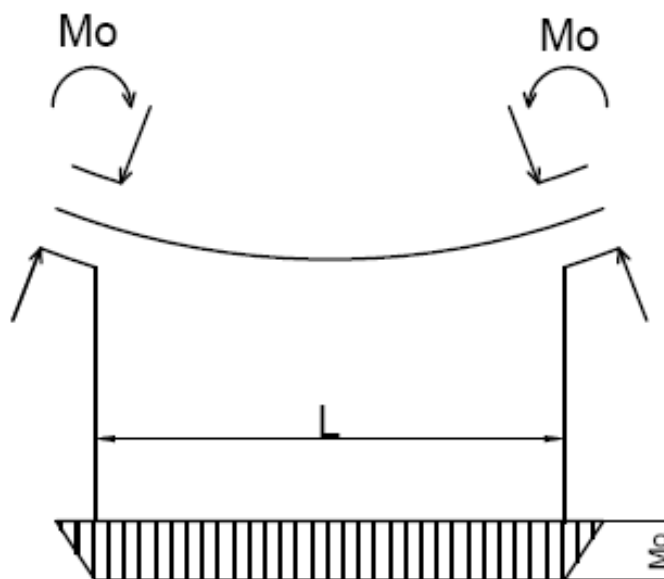
Pokud nechceme ztenčení stěny v místě ohybu, musíme vytvořit zásobu na materiálu v místě ohybu [2].

## 2.4. Momenty při ohýbání trubek

Protože se nejčastěji požaduje stejného poloměru ohybu v celém ohybu trubky, musíme na trubku v délce celého ohybu působit stejným momentem, nebo ohýbání bude probíhat po částech, tzn., že síly a momenty budou při ohybu měnit svá působišť. Nejlepším řešením se jeví rozdělení způsobu ohýbání dle momentu a sil, které působí na trubku při ohýbání bez zřetele, zda ohýbáme za studena nebo za tepla [1].

Z tohoto důvodu je možné ohýbání trubek do těchto skupin:

- Ohýbání pouhým ohybovým momentem, kde nepůsobí příčné síly kolmé k ose ohýbané trubky



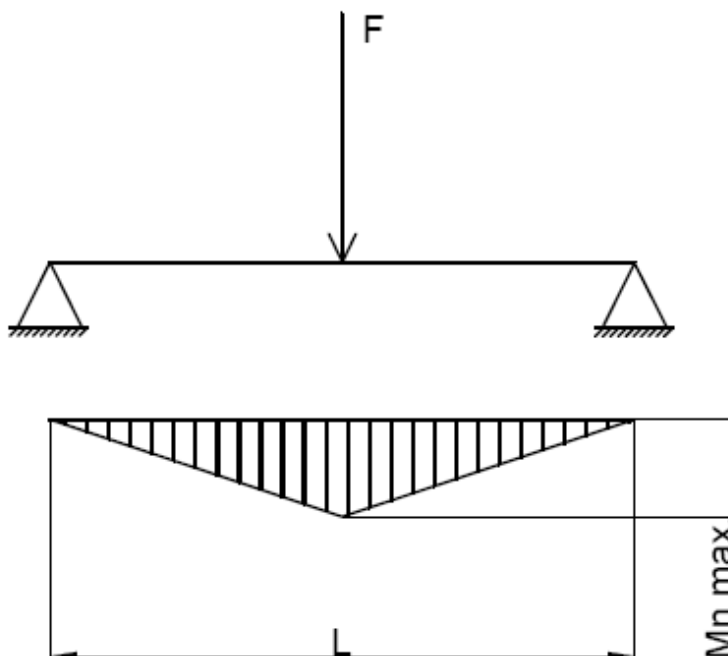
Obr. 3 Ohýbání pouhým momentem

Na obrázku vidíme průběh momentu v celé délce ohybu trubky. Je konstantní a proto tedy by mělo nastat rovnoměrné ohýbání v celé jeho délce  $L$  na stejný poloměr ohybu. Tuto úvahu však použijeme pouze při pružném ohybu. Složitější je průběh po překročení

meze kluzu, kdy se nám negativně projeví nestejnorodosti materiálu i různé odchylky tvaru příčného řezu trubky. Při ohybu trubky dochází totiž k vysokému stupni tváření a to převážně ve vnějších částech materiálu. Po překročení meze kluzu nastane nestejně prodloužení vláken trubky, a proto se trubky při ohybu nepříznivě deformuje. Z tohoto důvodu není tento způsob ohýbání trubek ideální a v praxi se ho moc nevyužívá. Hodí se spíše pro ohýbání trubek velkých průměrů při malém zakřivení, tzn. při velkém poloměru ohybu [1].

- Ohýbání příčnou silou

Ohýbání momentem, který je vyvolán příčnými silami působícími na trubku.



Obr. 4 Ohýbání příčnou silou

Z hlediska mechaniky je tento případ stejný jako namáhání nosníku na dvou podporách, který zatížíme osamělou silou. Velikost ohybového momentu není po celé délce trubky stálá. Velikost ohybového momentu klesá z maximální hodnoty pod zatěžující silou až na nulu, která je na podporách. Působíště sil vzhledem k trubce se nezmění. Tento způsob používáme při ohybu na lisech [1].

## 2.5 Ohýbání trubek za tepla

Ohýbání trubek za tepla se používá z těchto důvodů:

Při ohýbání trubek z materiálu, které jsou méně houževnaté by zastudena došlo k vyčerpání vnitřní přetvářené práce a to by vedlo k následnému praskání trubky. K stejným poruchám by docházelo i u materiálů houževnatých při malých poloměrech ohybu, překročila-li by deformace tažnost materiálu, z něhož je trubka vyrobena [1].

Z důvodů potřeby velkých sil, z čehož plyne použití velmi rozměrných a silně dimenzovaných strojů při ohýbání za studena. Pevnost materiálu při jeho zahřátí velmi klesá a proto klesají i síly potřebné k ohnutí trubky a práci je tedy možno provádět na slabších strojích. Trubek velkých průměrů se vyskytuje mnohem méně, a proto by tedy nebylo příliš vhodné použít pro tyto práce drahých strojů na ohýbání za studena [1].

Ohýbání trubek se dělí:

- Ohýbání navíjením na tvarový segment.

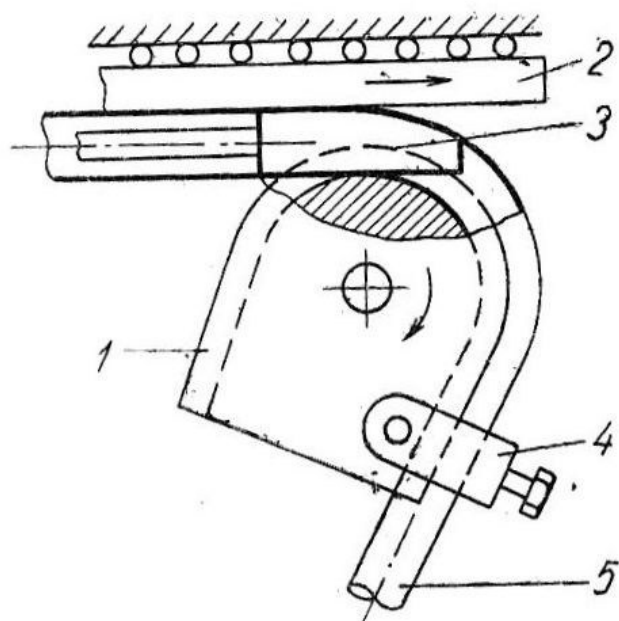
Ohybu se dosahuje postupně. Síly příčné kolmé k ose ohýbané trubky mění vzhledem k trubce své působíště. Ještě zde působí osově síly vyvozené třením trnu a přitlačné lišty, které způsobí přídavný tah. Ohýbání navíjení je jedním z nejpoužívanějších ohybů zastudena, kdy ohyb bývá do  $180^\circ$  [1].

- a. Ohýbání s opěrným trnem.

Ohýbací segment se otáčí a trubka na něm upnutá se přitlačuje. Trubka je vyztužená trnem kvůli zploštění (obr. č. 5) [1].

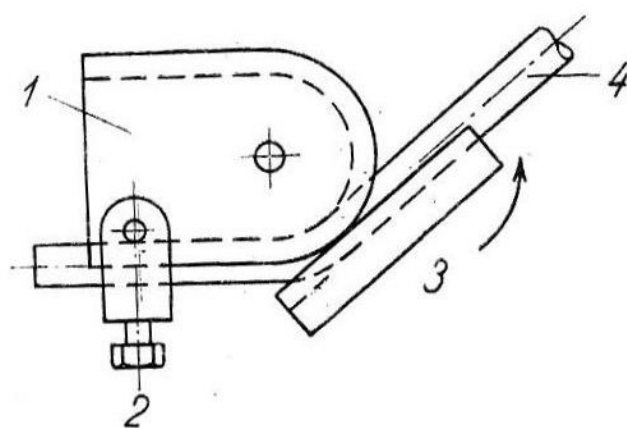
- b. Ohýbání bez trnů.

Ohýbací segment se při tomto způsobu nepohybuje a trubka je na segment dotlačována a navíjena tvarovou lištou nebo kotoučem (obr. č. 6) [1].



Obr. 5 Navíjení na trnu [1]

1. segment 2. lišta 3. trn 4. upínka 5. trubka

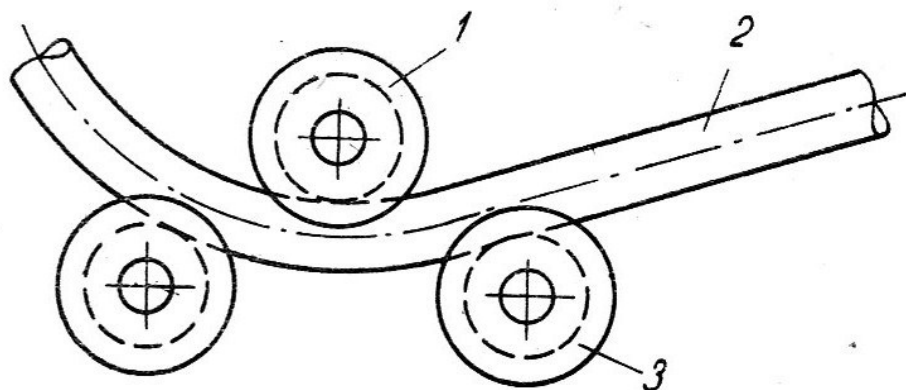


Obr. 6 Navíjení bez trnu [1]

1. pevný segment 2. upínka 3. otočná lišta 4. trubka

- Zakružování

Ohýbání zakružováním probíhá mezi třemi nebo více kotouči. Moment ohybu je vyvozen silami kolmými k ose trubky, která vzhledem k trubce mění své působíště. Trubka je při ohýbání ohýbacími kotouči vtahována nebo je mezi kotouče vtlačována. Kromě momentu ohýbacího zde může působit i moment krutící, takže můžeme zakružovat i do tvaru šroubovice (obr. č. 7) [1].

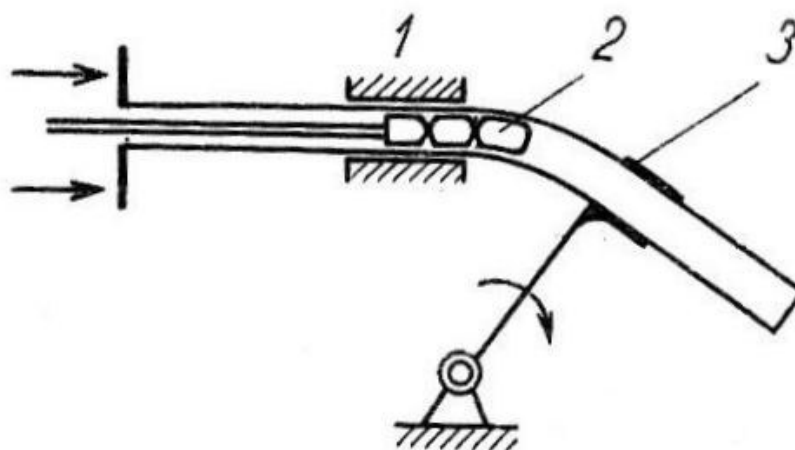


Obr. 7 Schéma zakružování [1]

1. vnitřní kladka 2. trubka 3. vnější kladka

- Ohýbání vytlačováním ohýbané trubky

Ohýbání vytlačováním trubky, která je vedena vodítkem a otáčí se kolem pevného čepu. Ohybový moment je zde vyvozen příčnými silami, které jsou kolmé v ose ohýbané trubky za působení osové síly (tlaku), která vzniká při vytlačování trubky. Síla mění vzhledem k trubce své působíště. Trubky se nejčastěji vytlačují hydraulickým pístem. K vyztužení trubky se používá článkového trnu, aby nedocházelo k zploštění a k zborcení trubky (obr. č. 8) [1].

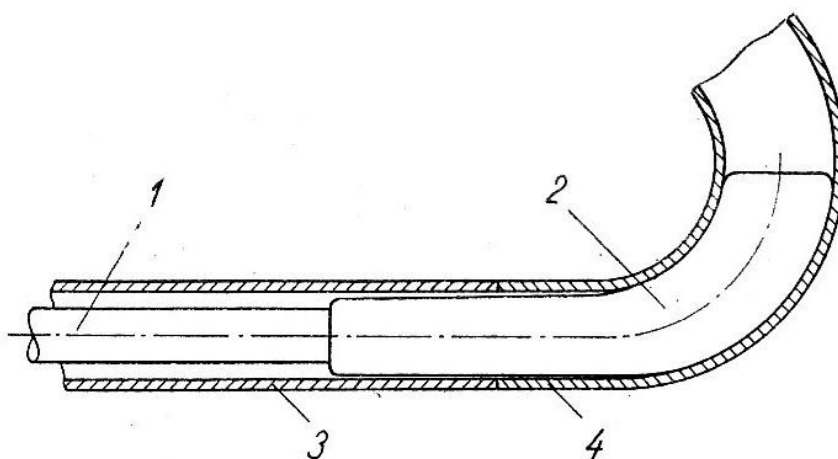


Obr. 8 Schéma vytlačování trubky [1]

1. vodítko 2. trn 3. upínací čelisti

- Ohýbání trubky převlékáním přes tvarový trn

Ohýbání trubky je zde způsobeno převlékáním přes tvarový trn. U tohoto způsobu ohybu je moment a průběh sil velmi složitý a významnou úlohu zde mají síly vyvolané třením o trn. Toto ohýbání se často provádí za tepla. Po ohýbání se kolena kalibrují v zápustce na lisu (obr. č. 9) [1].



Obr. 9 Schéma převlékání trubky přes trn [1]

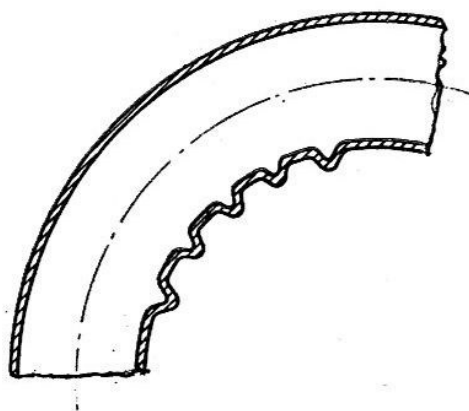
1. trnová tyč 2. trn 3-4. Trubka

- Ohýbání válcováním

Válcováním se stěna trubky v určitém místě zeslabuje, ale zároveň se taky protáhne. Proto je možno dosáhnout ohybu v různých prostorových tvarech [1].

- Ohýbání vytvořením záhybu

U tohoto způsobu je ohýbání momentem, kde působí příčné síly. Ohyb se provádí zásadně za tepla. Na ohřátý určitý úsek stěny trubky působí tlak, při kterém vzniká pěchování, potom vybočení stěny trubky a vytvoření záhybu (obr. č. 10) [1].



Obr. 10 Schéma vytvoření záhybu [1]

- Ruční ohýbání

Tuto technologii používáme u trubek malých průměru o velkém poloměru ohybu (trubka musí být měkká).

Používáme zde pružin, které se vkládají do trubky nebo na ni navlékají, aby chránily průřez trubky. Nejčastěji používáme na měděné trubky.

## 2.6 Dodávky vysokotlakého spojovacího potrubí - použití v praxi

Používá se pro elektrárny, kde dodáváme spojovací potrubí pro kotelnu, mezistrojovnu a strojovnu. Potrubí je zde použito pro vzájemné propojení technologických zařízení. Nejvýznamnějším českým výrobcem je Modřanská potrubní a.s., která dodávala spojovací potrubí třeba do Elektrárny Ledvice pro nový zdroj 660 MWe. Zde bylo užito ohýbání potrubí za tepla [14].

Protože v takovýchto elektrárnách pracujeme s nadkritickými parametry, teplota až 600° C a tlak 28 MPa, je vyžadováno potrubí o velkých tloušťkách, které odolají velkým tlakům.

Pro tuto výrobu se začaly používat nejmodernější žárupevné oceli např. x10CrWMoVnb9-2, která je na našem trhu dostupná pár let. A právě zde se objevují problémy, protože je zde potřeba ohýbat trubky z této oceli, například o vnějším průměru 530 mm a tloušťka stěn může být 90 mm. Trubky je potřeba ohnout na požadovanou jakost, svařovat jak ve výrobě tak na montáži [14].

Výroba hladkých ohybů je nedílnou součástí stavby každého vysokotlakého potrubí.

V Modřanské potrubní je několik let používáno procesu indukčního ohřívání na strojích speciální konstrukce, které jsou určeny pouze pro tuto práci [14].

Pro ohýbání velkých průměrů a tloušťek se používají CNC stroje, na obr 11., které jsou od holandské firmy Cojafex B.V. Tyto stroje musejí mít velkou tvářecí sílu a jsou určeny speciálně pro výrobu velkých ohybů z oceli s velkým přetvářecím odporem. Ohýbačky pracují na principu postupného ohýbání trubky zatepla s indukčním středofrekvenčním ohřevem úzkého středofrekvenčního pásu. Všechny stěžejní parametry procesu ohýbání jsou řízeny počítačem a ostatní parametry jsou monitorovány a zaznamenávány. Po procesu ohýbání je novým způsobem požadováno dosáhnout struktury a vlastností původní oceli. Dříve stačilo po ohýbání menších tloušťek a rozměru ochlazování na vzduchu. Ale u velkých tloušťek stěny potřebujeme k dosažení struktury a vlastností původního materiálu zrychlené ochlazování z teploty austenitu v kapalině [14].



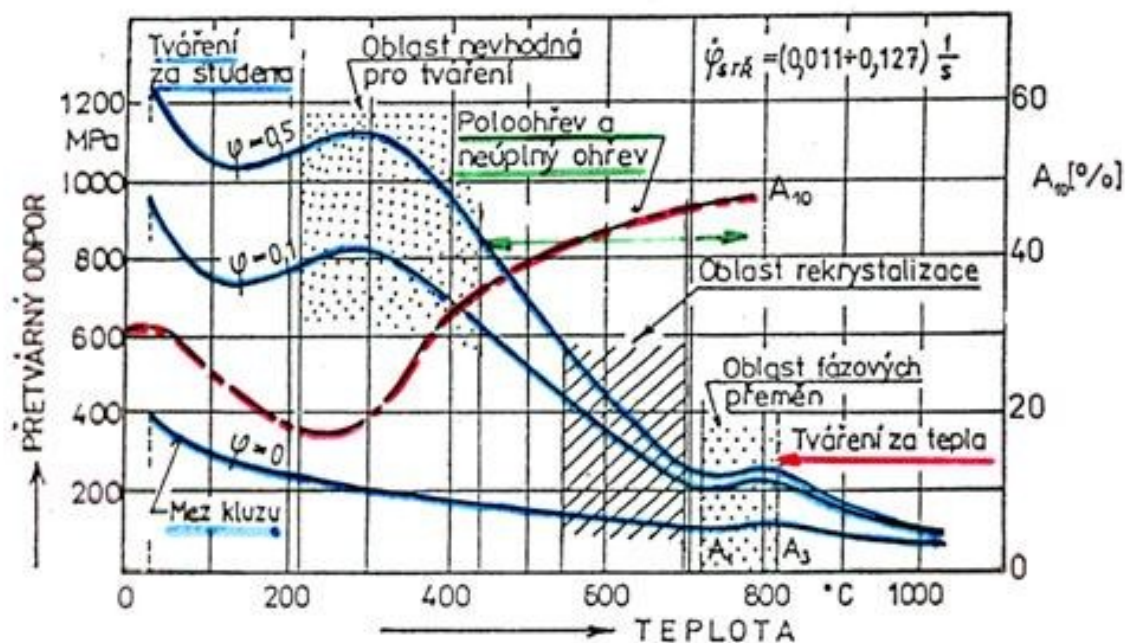


Obr. 11 Ohýbačka speciální konstrukce [10]

K ověření indukčních ohybů a prokázání jejich vlastností převážně mechanických, které nemůžeme na hotovém výrobku nedestruktivně zkoušet, používáme zkoušky postupu ohýbání. Je to obdoba zkoušek při svařování, kdy na hotovém svaru také nemůžeme nedestruktivně zjistit požadované vlastnosti. Vychází se zde z toho, že se zkoušky i vlastní výroba uskutečňují podle stejných technologických parametrů, které jsou předem navrženy a odzkoušeny a předpokládá se, že výsledky dosažené na vzorku budou stejné jako na hotovém výrobku [14].

## 2.7. Rozdělení tváření dle teploty

Úvodem k ohýbání trubek za tepla je potřeba zmínit hlavní zásady tváření.



Obr. 12 Rozdělení tvářecích procesů podle teploty [17]

Rozdělení procesů tváření dle teploty je rozdělení vztahu teploty tvářeného materiálu k teplotě rekrytalizace. Rekrytalizační teplotou se nazývá teplota, při které dojde k regeneraci deformovaných zrn, které vznikly tvářením za studena bez změny krystalové mřížky [17].

### Tváření za studena

K tváření za studena dochází pod rekrytalizační teplotou, tedy teplota tváření se nachází pod 30 % teploty tání tvářeného materiálu, dochází ke zpevnění, které přetrvává a zvětší se nárůst k dalšímu tváření, dochází k vyčerpání plasticity materiálu. Zpevněním se zvětší mechanické hodnoty, tj. mez kluzu a mez pevnosti a klesne tažnost. Pokud kov zahřejeme, můžeme obnovit deformační schopnost. Materiál získá opět své plastické vlastnosti. Nevýhodou je nutnost použít velké síly k tváření, dochází k nerovnoměrnému zpevnění a omezené tvárnosti materiálu [17].

## **Tváření zatepla**

K tváření zatepla dochází nad rekrystalizační teplotou, rychlost rekrystalizace je natolik vysoká, že zpevnění dosažené tvářením mizí již v procesu tváření nebo okamžitě po něm.

Teplota tváření se nachází nad 70 % teploty tání materiálu. V materiálu nedochází ke zpevnění a k tváření stačí síly podstatně nižší. Nevýhodou však bývá povrch, který je nekvalitní z důvodů okuji a navíc hrubé zrno, což může být problémem u dalších technologických operací z důvodu kvality. Proces je zdlouhavý, tedy i nákladný, kladem ale je odstranění trhlin, bublin atd. [17].

Při ohýbání za tepla je potřeba dbát příslušných norem materiálu, které nám předepisují tvářecí teploty. Je velmi důležité, aby při ohýbání za tepla neklesla teplota pod spodní mez, což bývá u tenkostěnných trubek velmi snadné. V některých případech bývá nutné po ohýbání ještě tepelné zpracování. Zpravidla se jedná o legované materiály. Postup tepelného zpracování nebo vypracovaný postup na požadované vlastnosti je nutno přesně dodržet [17].

## **Tváření za poloohřevu**

Tváření za poloohřevu je kompromisem mezi tvářením za tepla a tvářením za studena. Dochází zde k zlepšení přetvárných vlastností na rozdíl od tváření za studena, přetvárné odpory se sníží. Dojde ke zlepšení fyzikálních a mechanických vlastností, jakosti povrchu a zlepšení vlastností. Oxidace povrchu omezuje horní teploty [ 17].

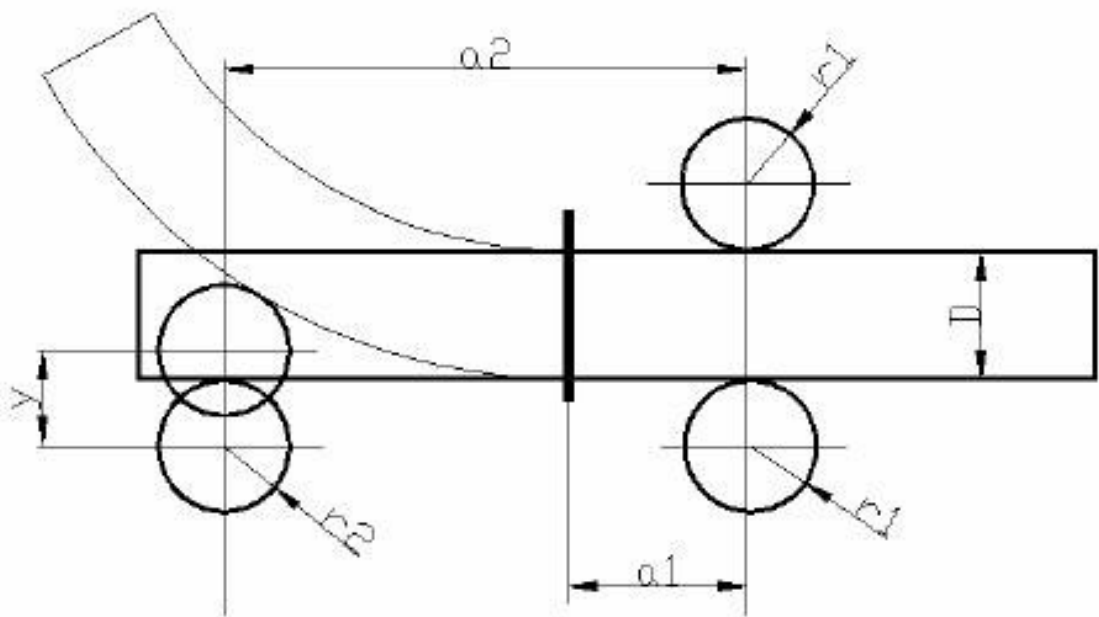
### **3. Sestavení relace proměnných pro ohýbání trubek za tepla**

Sestavení matice proměnných spočívá převážně v zamezení ztráty kruhovitosti v místech, kde dojde ke kontaktu materiálu s kladkami, zeslabování a vrásnění na trubce v místech ohybu. Sestavením matice proměnných zamezíme alespoň z části těmto nepříznivým vlivům. Pro dosažení matice použijeme vstupních parametrů pro nastavení a výpočet ohybu. Výsledkem budou získaná data (výstupní), pomocí kterých bychom nastavili ohýbací stroj pro použití v praxi.

#### **3.1 Vstupní data a nastavení stroje pro ohýbání**

Ohýbací zařízení pracuje následovně:

Trubka je zahřívána v úzkém pásmu indukčního ohřevu, aby bylo dosaženo co nejvyšší tažnosti materiálu a nedocházelo ke zdeformování trubky. Nepotřebujeme tedy tak velké síly potřebné k ohybu. Zezadu je trubka tlačena kupředu tlačným zařízením a dále je vedena vodícími kladkami (otáčí se), a ohýbací kladkou (otáčí se) je dosaženo požadovaného ohybu trubky (obr. č. 13).



Obr. 13 Schéma kladkové ohýbačky [6]

$a_1$ – délka mezi kladkami a induktorem	[mm]
$a_2$ – vzdálenost mezi kladkami	[mm]
$r_2$ – poloměr ohýbací kladky	[mm]
$r_1$ – poloměr vodící kladky	[mm]
$D$ – průměr trubky	[mm]
$y$ – vzdálenost mezi kladkami pro nastavení velikosti oblouku	[mm]

### 3.2 Limity ohýbání trubek za tepla

Tyto kritéria nejsou u nás ani v zahraničí jednoznačně normalizovány. Zpravidla se jedná o empirické doporučení výzkumných pracovišť. Limity ohýbání vychází z vlastností ohýbaného materiálu, profilu trubky, požadavků na přesnost a požadavků na ohyb [6].

- 1- Tvorba trhlin na vláknech při dosažení meze průtažnosti.
- 2- Borcení profilů podél vnitřních vláken.
- 3- Ztráta tvaru trubky.

### **Poloha deformační zóny, odtlačovací kladka**

Nastavení zařízení:

$$y = R_{\min} + \frac{D}{2} + r_2 - \sqrt{\left(R_{\min} + \frac{D}{2} + \frac{r_2}{2}\right)^2 - a_2^2} \quad (1)$$

Vztah definuje vazbu nastavení zařízení na poloměr osy trubky.

Rozměr  $a_1$ , který popisuje vzdálenost mezi osou kladky a induktorem je podstatný, protože se v místech ohřevu vytváří tzv. plastický kloub a předchozí rovnice mění svůj tvar [6].

Rovnice upravená o ohřev:

$$y = R_{\min} + \frac{D}{2} + r_2 - \sqrt{\left(R_{\min} + \frac{D}{2} + \frac{r_2}{2}\right)^2 - (a_2 - a_1)^2} \quad (2)$$

$a_1$  – délka mezi kladkami a induktorem [mm]

$a_2$  – vzdálenost mezi kladkami [mm]

$r_2$  – poloměr ohýbací kladky [mm]

$D$  – průměr trubky [mm]

$R_{\min}$  - minimální poloměr, na který můžeme poloměr ohnout [mm]

$y$  – vzdálenost mezi kladkami pro nastavení velikosti oblouku [mm]

Z tohoto faktu vyplývá, že bude oblouk ohýbán na menší poloměr a bude docházet ke ztrátě kruhovitosti, popřípadě alespoň tvarová přesnost oblouku bude porušena. Vodicí

kladky mají vliv na přesnost oblouku svým tvarem a velikostí kladek. Na kruhovitost však mají jen nepatrný účinek [6].

**Tuhost prstence v místě kontaktu s kladkou.** Průhyb prstence se počítá obecně na poloměru podle vzorce:

$$\Delta r = 0,0745 \frac{F \cdot r^3}{E \cdot J} \quad (3)$$

Kde r (poloměr středního vlákna prstence) se počítá podle vztahu:

$$r = \frac{(D - s)}{2} \quad (4)$$

$\Delta r$ - průhyb prstence	[mm]
D - průměr trubky	[mm]
s - tloušťka stěny trubky	[mm]
F - působící síla	[N]
E - modul pružnosti	[MPa]
J - moment setrvačnosti v průřezu	[mm <sup>4</sup> ]
r - poloměr středního vlákna prstence	[mm]

Moment setrvačnosti v průřezu počítáme podle rovnice:

$$J = \frac{b \cdot s^3}{12} \quad (5)$$

b - šířka prstence - předpokládá se, že je jako průměr trubky. [mm]

Modul pružnosti E je třeba brát dle teploty. Kolem austenizační teploty je 164 000 MPa pro námi použité oceli.

Odchylka kruhovitosti se počítá dle rovnice:

$$o = \frac{\Delta r}{r} = \frac{\Delta D}{D} \quad (6)$$

**Délka ramene kladky** – vzdálenost ohýbací kladky od induktoru ( $a_2 - a_1$ ). Minimální hodnota rozměru kladky je omezena tuhostí prstence ve styku trubky s kladkou, kde přenáší sílu, která je zapříčiněna odporem při ohybu. Vztah pro reakci na ohýbací kladce: [4]

$$F = \frac{\sigma_p \cdot W}{L} \quad (7)$$

L- vzdálenost mezi induktorem a ohýbací kladkou [mm]

Přetvárný odpor ohybu počítáme dle rovnice:

$$\sigma_p = C \cdot e^n \quad (8)$$

e – Deformace [-]

n – materiálová konstanta [-]

Deformaci e počítáme podle vztahu :

$$e = \ln\left[\left(R + \frac{D}{2}\right) / R\right] \quad (9)$$

$R \geq R_{\min} = 4 \cdot k \cdot (D - s)$  - poloměr ohybu v ose trubky [4]

k - materiálový parametr [-]

$R_{\min}$  - Minimální poloměr ohybu [mm]

Modul odporu průřezu v ohybu spočítáme dle vztahu:

$$W = \frac{\pi}{2} D^3 \left(1 - \frac{d^4}{D^4}\right) \quad (10)$$



Vnitřní průměr kladky (d) spočítáme dle rovnice:

$$d = D - 2 \cdot s \quad (11)$$

$\sigma_p$  - přetvárný odpor v průhybu [Mpa]

W – modul odporu průřezu v ohybu [ $mm^3$ ]

d – vnitřní průměr kladky [mm]

C – materiálová konstanta [-]

n - materiálová konstanta [-]

k – parametr, který se vyhodnocuje pomocí plastometrických měření [-]

### 3.3 Materiálové reprezentanty - popis, tenkostěnné trubky

V bakalářské práci budu posuzovat ohýbání trubek u dvou materiálů a to nelegovanou konstrukční ocel 11523 a žárupevnou ocel 15128.

Obě dvě oceli budou zkoumány na trubkách o průměru 377 mm a tloušťce stěny 16 mm.

Z tloušťky stěny a poloměru trubky vyplývá, že se jedná o tenkostěnné trubky.

(Poměr  $D/s > 25$ ). Zpravidla se tyto trubky ohýbají na vřetenu. [4]

D - průměr trubky [mm]

s - tloušťka stěny trubky [mm]

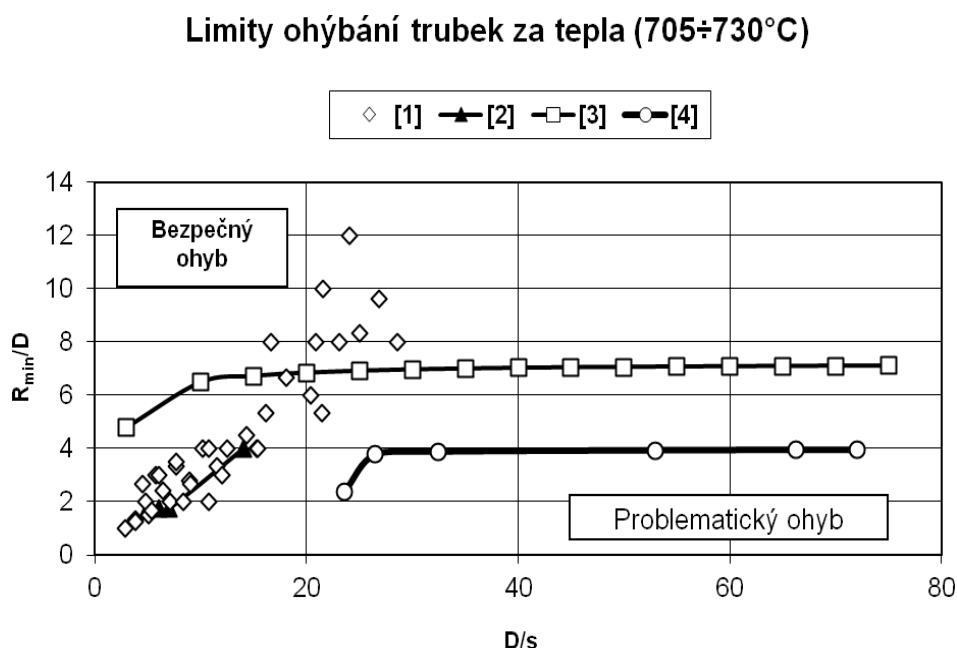
Pro bezpečný ohyb tenkostěnných trubek bez vřetena jsou navržena tato doporučení:

#### Dodržení minimálního poloměru ohybu

$$R_{\min} \geq 4 \cdot k \cdot (D - s) \quad (12)$$

Koeficient **k** je pro ohýbání za studena 0.7-1. Za tepla se doporučuje jeho minimální hodnota 1.8. Chemické složení nebude mít vliv na koeficient k, pokud bude teplota

dodržena v okolí austenizační hranice. Pokud zahrneme oba dva vlivy ( $R_{\min}$  a  $D/s$ ) vznikne graf bezpečného a problematického ohybu - obr. 14. [6]



Obr. 14 Limity ohýbání trubek za tepla [6]

k	T °C			
materiál	730	850	960	1050
11523	1,80	2,10	2,37	2,59
15128	1,83	2,10	2,34	2,53

Tab. č. 1 Koefficient k pro materiálové reprezentanty [6]

Uvedená doporučení ohledně tenkostěnných trubek neplatí úplně a vždy může dojít k drobné změně tvaru, než bylo požadováno. Dalším opatřením je použití **vřetena nebo plnicího písku při ohýbání** [6].

- Ocel 11523

Nelegovaná konstrukční jemnozrnná jakostní ocel vhodná ke svařování. Používá se na mostní a jiné svařované konstrukce, pro **ohýbané profily**, svařované konstrukce z dutých profilů a součásti strojů, automobilů, motocyklů a jízdních kol. Je také součástí tepelných energetických zařízení a součásti tlakových nádob [13].

- Ocel 15128

Ocel Cr-Mo-V jakostní, je používána pro vyšší teploty (žárupevná). Používá se převážně na součásti energetických a chemických zařízení pracujících při teplotách do 580° C. Svařitelnost je zaručená (podmíněná) [13].

Normy ČSN	
Označení oceli	ČSN
11523	ČSN 411523
15128	ČSN 41 5128

Tab. 2 Označení ocelí 11523 a 15123 dle normy ČSN.

Chemické složení [%]					
C	Si	Mn	P	S	N
0,2	0,55	1,6	0,04	0,04	0,009

Tab. 3 Chemické složení oceli 11523 [15]

Chemické složení [%]							
C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	V
0,10-0,18	0,15-0,40	0,45-0,70	≤ 0,040	≤ 0,040	0,40-0,60	0,50-0,75	0,22-0,35

Tab. 4 Chemické složení oceli 15128 [12]

Mechanické vlastnosti oceli [MPa]	
Mez pevnosti Rm	450-630
Mez kluzu Re	275

Tab. 5 Mechanické vlastnosti 11523 [15]

Mechanické vlastnosti oceli [MPa]	
Mez pevnosti Rm	460-610
Mez kluzu Re	≥ 320

Tab. 6 Mechanické vlastnosti 15128 [12]

Tepelné zpracování oceli [°C]	
normalizační žíhání	870 - 900
žíhání na měkko	680 - 710
žíhání ke snížení pnutí	600 - 650
popouštění	670 - 700
tvářitelnost	1 150 - 800

Tab. 7 Tepelné zpracování oceli 11523 [15]

### 3.4 Teplota ohřevu a rychlost posuvu

Doporučené teploty jsou těsně pod austenizační teplotou, záleží na chemickém složení materiálu. Příliš vysoké teploty nedoporučujeme, vedly by k poruše tvaru a ztrátě stability trubky (trubka by přišla o svoji kruhovitost). Tloušťka stěny a rozměry trubky mají velký vliv na ohřátí trubky, které musí být dostatečné v celém jejím průřezu [6].

Doporučený rozsah teplot: 705-730° C max. 830° C, ale s následným chlazením. Na teplotě závisí další veličina a tou je rychlost, kterou tlačné zařízení posouvá trubku. Nesmí docházet k nerovnoměrnému prohřátí trubky z důvodů velkých posuvů. Teplota je tedy nadřazena nad rychlostí posuvu. Rychlost ohýbané trubky zpravidla volíme v praxi kolem 20 – 50 mm/min. [6].

### Indukční ohřev

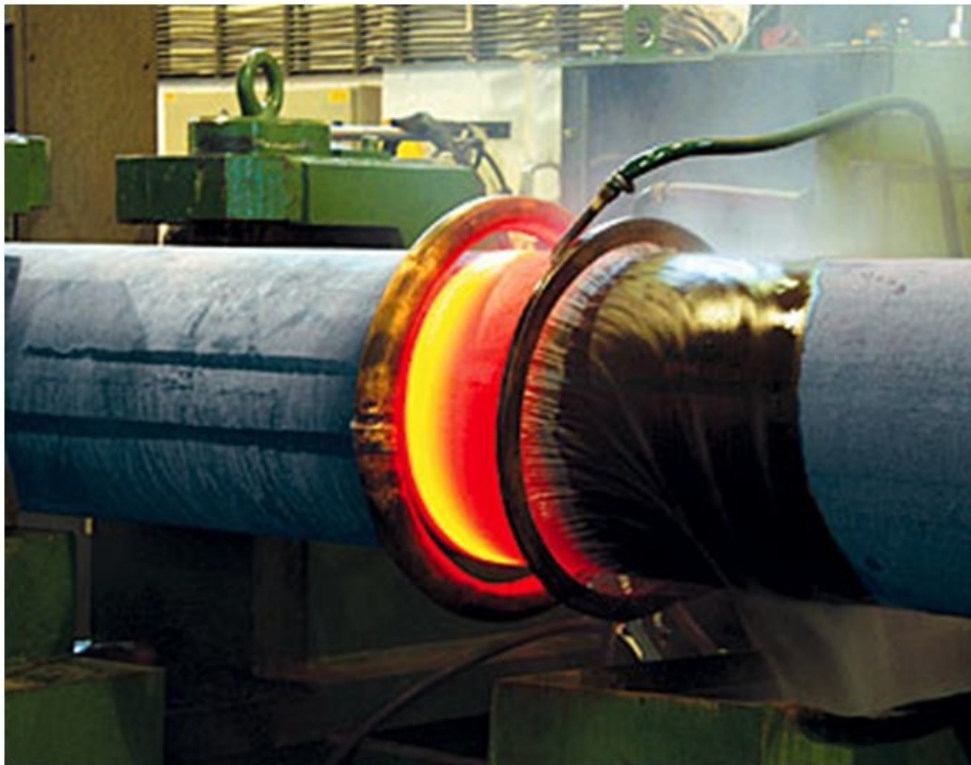
Při indukčním ohřevu materiál prochází přes vodou chlazenou cívku, které se říká induktor (ten je napájen proudem v rozmezí 10 až 300A) a má svůj střední (3 – 50kHz) nebo vysoký kmitočet (50-500), který je dodáván ze středofrekvenčního nebo vysokofrekvenčního generátoru. K ohřevu materiálu pak dochází bezdotykově v úzké blízkosti induktoru pomocí indukce obr. č. 15. Podle Lenzova indukčního zákona existuje ve vodiči, který je umístěn do proměnného magnetického pole elektromagnetická síla, ve kterém vznikají indukované proudy( vířivé proudy). Tyto proudy vytváří v materiálu Jouleovo teplo [11].

Pro indukční ohřev se používá vysokofrekvenčních a středofrekvenčních generátorů .

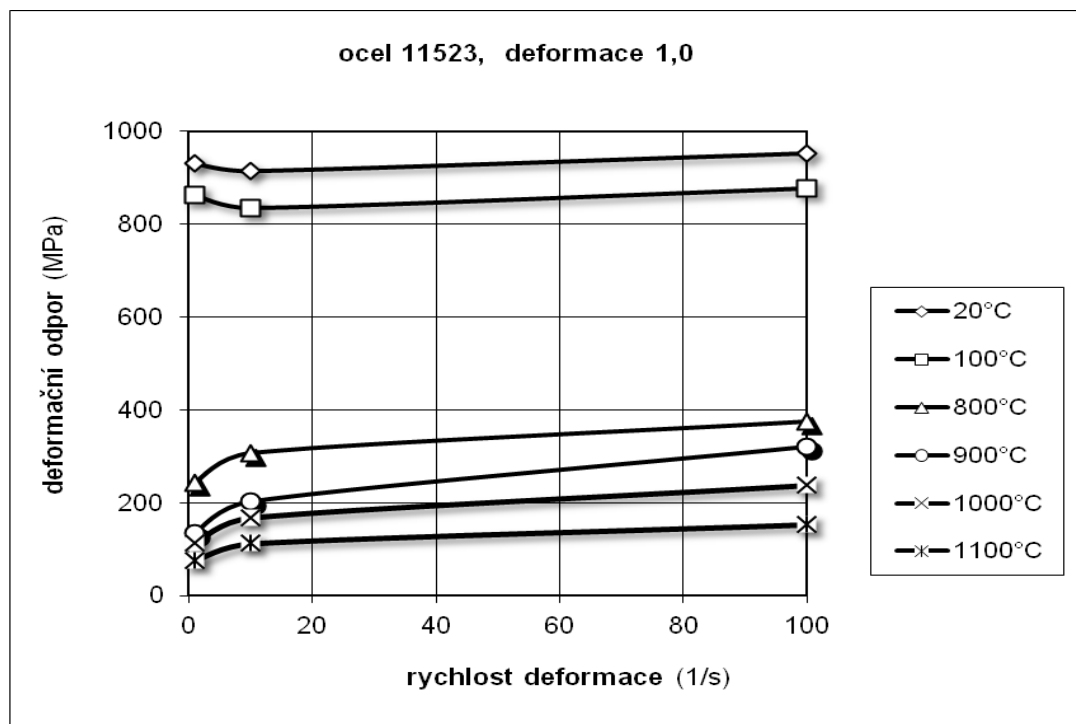
Výhody indukčního ohřevu:

- Není potřeba kontaktu mezi materiálem a cívkou
- Vysoká rychlost ohřevu a jeho hustota
- Dobré řízení teploty kovu
- Můžeme určit přesnou zónu, kterou chceme ohřívat
- Jednoduchost zařízení a její činnosti
- Velká pružnost regulace
- Dobrá účinnost
- Minimální účinky na životní prostředí

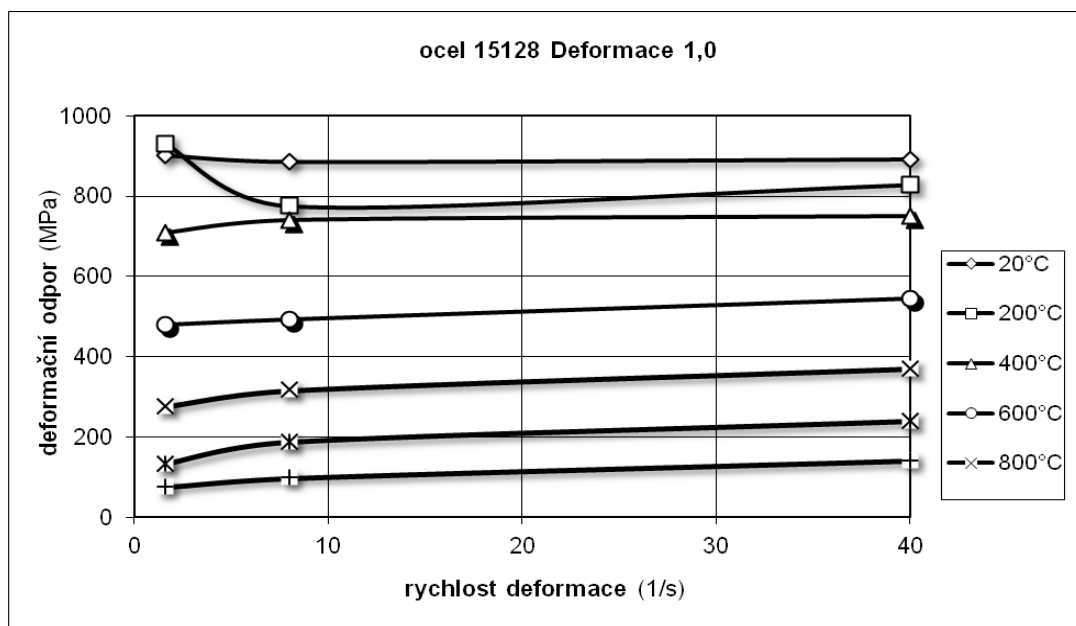
Co se týče účinnosti, je při porovnání s plynovou pecí a nebo odporovou pecí mnohem energeticky úspornější [11].



Obr. 15 Indukční ohřev trubky



Obr. 16 Rychlost deformace pro ocel 11523

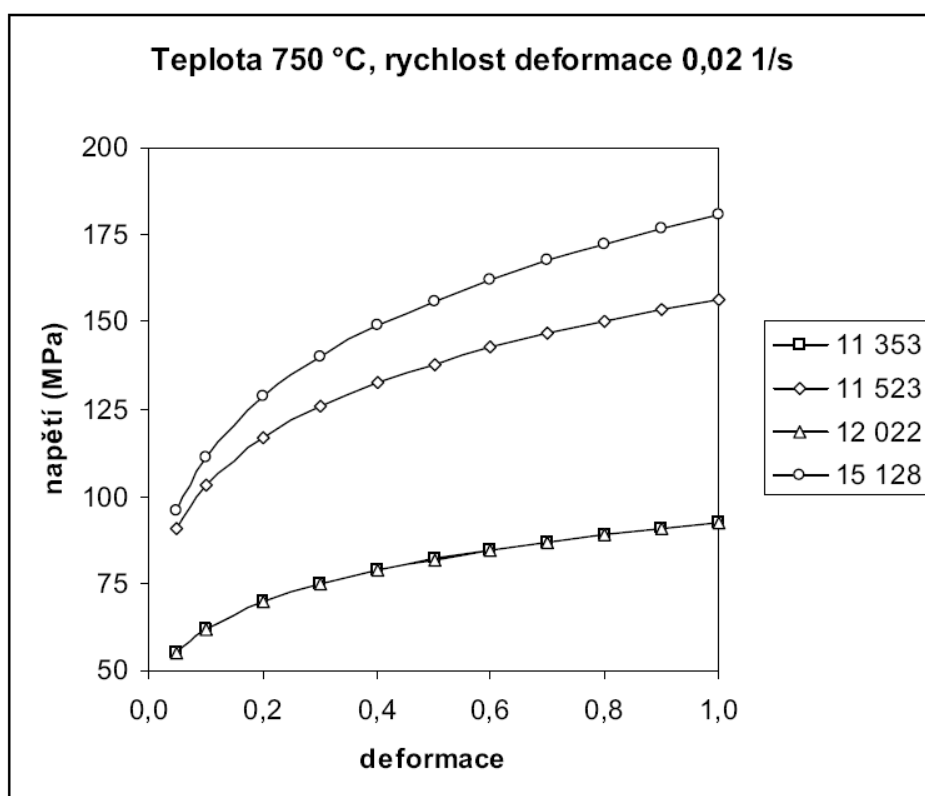


Obr. 17 Rychlost deformace pro ocel 15128

### 3.5 Přirozený přetvárný odpor

Je schopnost materiálu odolávat přetvoření (změně tvaru). Přetvárný odpor materiálu závisí na mnoha parametrech a to: [8]

- Teplotě
- Deformační rychlosti
- Tření
- Rozměrech tělesa
- Mezi kluzu



Obr. 18 Přirozený přetvárný odpor [7]

Na obrázku č. 18 vidíme přirozený přetvárný odpor ocelí, nás budou zajímat oceli 11523 a 15128 při teplotě 750° C a rychlost deformace 0,02 1/s [7].

### 3.6 Výstupní parametry

- Jsou dosažené výsledky po ohybu
- mezi výstupní parametry patří:
  - Výsledný tvar oblouku (poloměr oblouku)
  - Rozměr oblouku
  - Kruhovitost oblouku

Chceme, aby výsledný tvar ohybu byl co nejpřesnější a trubce zůstal její tvarový profil (nedošlo k nežádoucí změně kruhovitosti). Dále nechceme, aby na povrchu trubky došlo k příliš velkým deformacím, které by změnily její povrch a tvar.



## 4. Specifikace sil a momentů ohýbání trubek za tepla

### 4.1 Nastavení ohybové kladky

Pro výpočet budeme vycházet z obrázku kladkové ohýbačky trubek obr. 13.

Ohýbací kladka je nastavena v podélném a příčném směru podle požadovaného poloměru ohybu takto: [5]

$$y = R_{\min} + \frac{D}{2} + r_2 - \sqrt{\left(R + \frac{D}{2} + r_2\right)^2 - (a_2 - a_1)^2} \quad (13)$$

$a_1$  – délka mezi kladkami a induktorem [mm]

$a_2$  – vzdálenost mezi kladkami [mm]

$r_2$  – poloměr ohýbací kladky [mm]

$D$  – průměr trubky [mm]

$R_{\min}$  - minimální poloměr, na který můžeme poloměr ohnout [mm]

$y$  – vzdálenost mezi kladkami pro nastavení velikosti oblouku [mm]

Tento vztah pro kinematické zakružování je pouze orientační, kvůli odpužením (teplotně proměnný modul pružnosti), proto je nutné provádět korekce provozních podmínek v podélném i příčném směru [5].

### 4.2 Rovnice pro ohybový moment a přítláčnou sílu vodících a ohybové kladky

Z důvodů kontroly byly použity pro dynamické ohýbací parametry vztahy klasického typu, které se počítají pro momenty a síly při zakružování profilů [5].

Ohybový moment počítáme ze vztahu pro plastický ohyb:

$$M_o = \frac{3 \cdot \sigma_p \cdot W_o}{(2 + n)} \quad (14)$$

Přítlačná síla vodících kladek se spočítá z modifikovaného vztahu:

$$F_{kl.v} = \frac{3 \cdot \sigma_p \cdot W_o}{[2(1+n) \cdot R]} \quad (15)$$

$\sigma_p$  - přetvárný odpor materiálu (odpovídá teplotě a procesu plastické deformace) [MPa]

$W_o$  - průřezový modul trubky v ohybu [mm<sup>3</sup>]

$n$  - exponent zpevnění materiálu (blíží se nule při tváření za tepla) [-]

$M_o$  - ohybový moment [N.m]

Přítlačnou sílu ohýbací kladky spočítáme z upraveného vzorce pro zakružování:

$$F_{kl.o} = \frac{3 \cdot \sigma_p \cdot W_o}{[(1+n) \cdot R]} \quad (16)$$

$\sigma_p$  - přetvárný odpor materiálu (odpovídá teplotě a procesu plastické deformace) [MPa]

$W_o$  - průřezový modul trubky v ohybu [mm<sup>3</sup>]

$n$  - exponent zpevnění materiálu (blíží nule při tváření za tepla) [-]

Při obyčejném zakružování je přenášen kroutící moment na hnacím válci třením na profil, který zakružujeme. V tomto případě je vyvíjený tlak tečný k ohýbanému zakružovanému oblouku. Uvažujeme koeficient tření roven 1. Tento způsob tedy uvažuje rovnost reakcí, to znamená, že síla, která působí na tlačné zařízení, je rovna ohýbací síle.[5]

## **5. Analýza parametrů ohybu trubek pro rozměrové a materiálové reprezentanty**

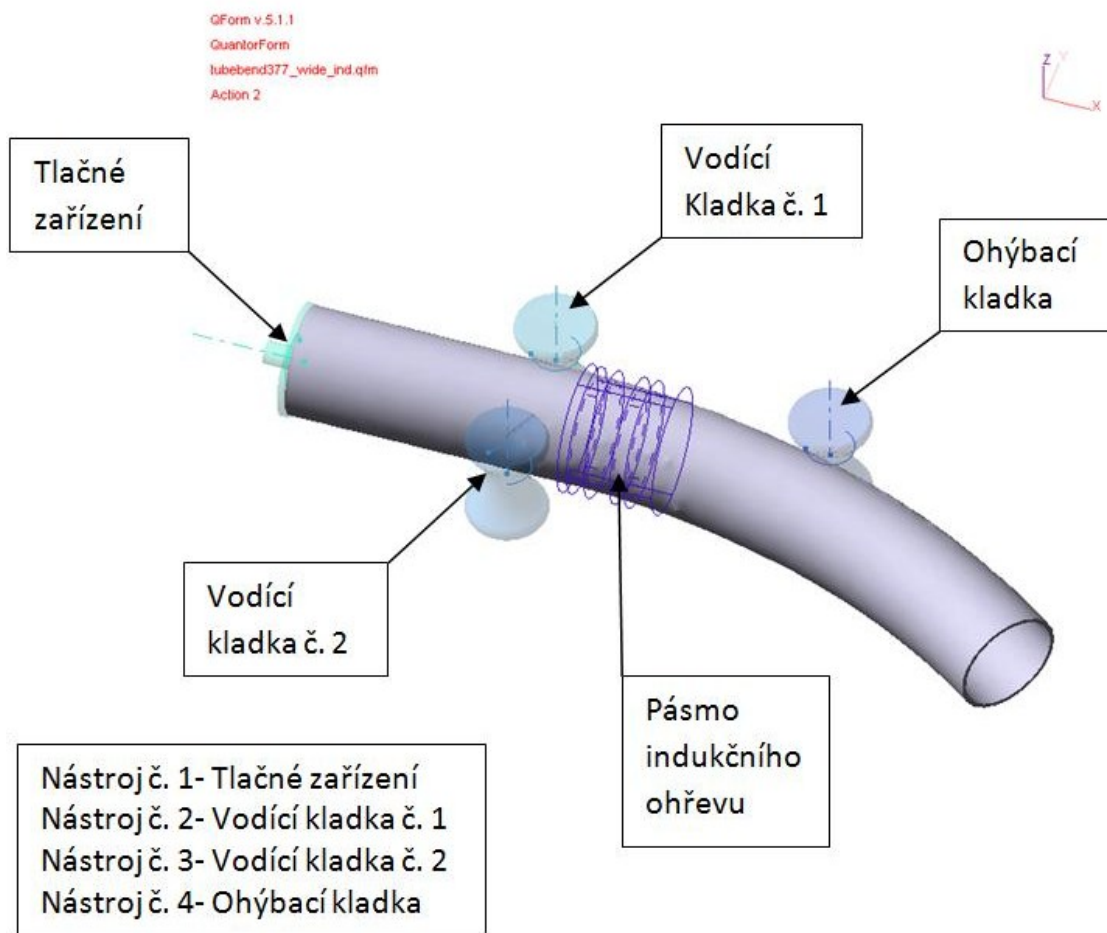
### **5.1 QForm**

- Je program určený pro simulaci ohýbání a vyhodnocení výsledků bakalářské práce. Na počítači byla použita verze 5.1.
- Program Qform-3D byl uveden na trh v roce 2002. Kombinuje 2D a 3D simulaci a zachovává si snadné rozhraní ze svého předchůdce Qform 2-D. Můžeme ho použít pro simulaci tvářecích procesů za studena i tepla.
- Program má v sobě editor, jehož součástí je katalog materiálů. Obsahuje také předdefinované stroje (buchary, lisy).
- Qform dále obsahuje přehledný editor určený pro 2D a 3D geometrii, ve kterém se vytvoří modely.
- Po připravení modelů se určí, který model bude nástroj a který zase polotovár.
- Dále nadefinujeme parametry, slouží nám k tomu jednoduchý průvodce, takže se nemůže stát, že bychom důležité parametry opomenuli a nenastavili.
- Software dokáže předpovídat vady materiálového toku, tak i rozložení teplot, deformací a sil ve zkoumaném materiálu a tvářecím nástroji.
- Výstupní data lze jednoduše sledovat na grafech, které program umí jednoduše vygenerovat [9].

### **5.2 Postup ohýbání trubek za tepla v programu Qform**

Na obrázku č. 19 vidíme model vygenerovaný v programu Qform, uspořádání je stejné jako na obr. č. 13 (schéma kladkové ohýbačky). Připomenu tedy postup ohýbání trubky za tepla s tlačným zařízením a ohýbací kladkou:

Trubka je zahřívána v úzkém pásmu indukčního ohřevu, aby bylo dosaženo co nejvyšší tažnosti materiálu a nedocházelo ke zdeformování trubky. Zezadu je tlačena kupředu pomocí nástroje č. 1 (tlačné zařízení) a dále je vedena vodícími kladkami č. 1, č. 2 (otáčí se) a ohýbací kladkou č. 3 (otáčí se) je dosaženo požadovaného ohybu trubky.



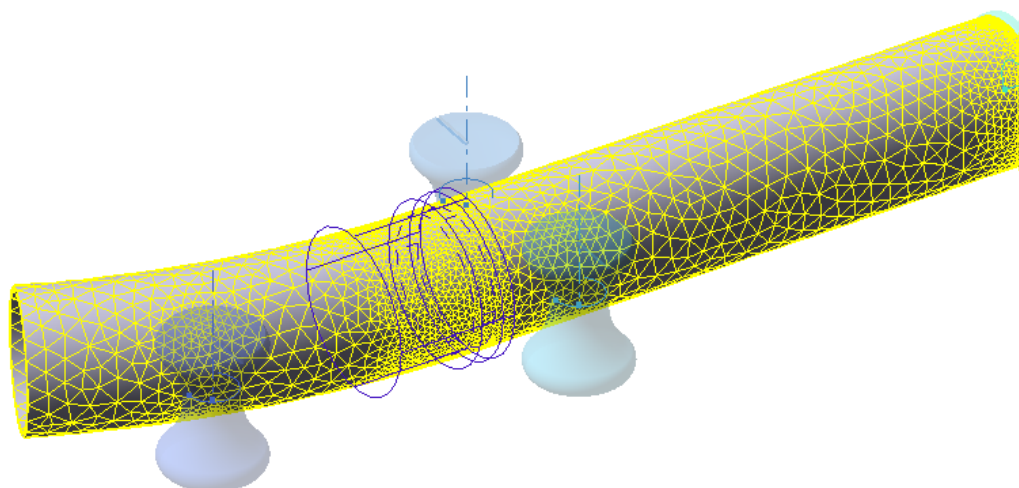
Obr. 19 Popis nástrojů potřebných pro ohyb

Označení nástrojů v tabulce využijeme v následujících měřeních.

## Metoda MKP

Metoda konečných prvků. Je numerická metoda pro analýzu těles. Používá se převážně tam, kde nejde těleso klasickým postupem zkoumat. Metoda spočívá v rozdělení tělesa na velmi malé části, které se dají lépe matematicky popsat [16].

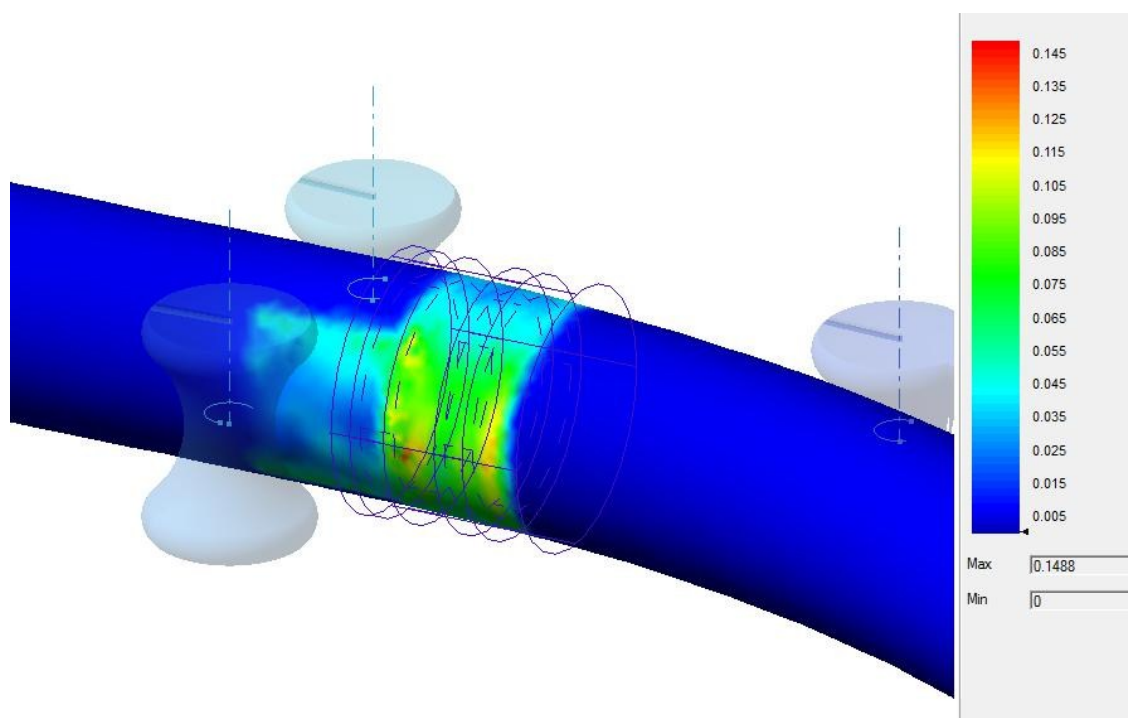
Z obrázku č. 20 je patrné, že model má v místě indukčního ohřevu vypracovanou mnohonásobně hustší síť prvků. Je to z důvodů změny struktury materiálu v místě indukčního ohřevu a vyhodnocení výsledků. Kdyby nebyla síť prvků vypracována z tolika bodů, výsledky by nebylo možné považovat za přesné. Také proto trvalo vyhodnocení počítači šest týdnů.



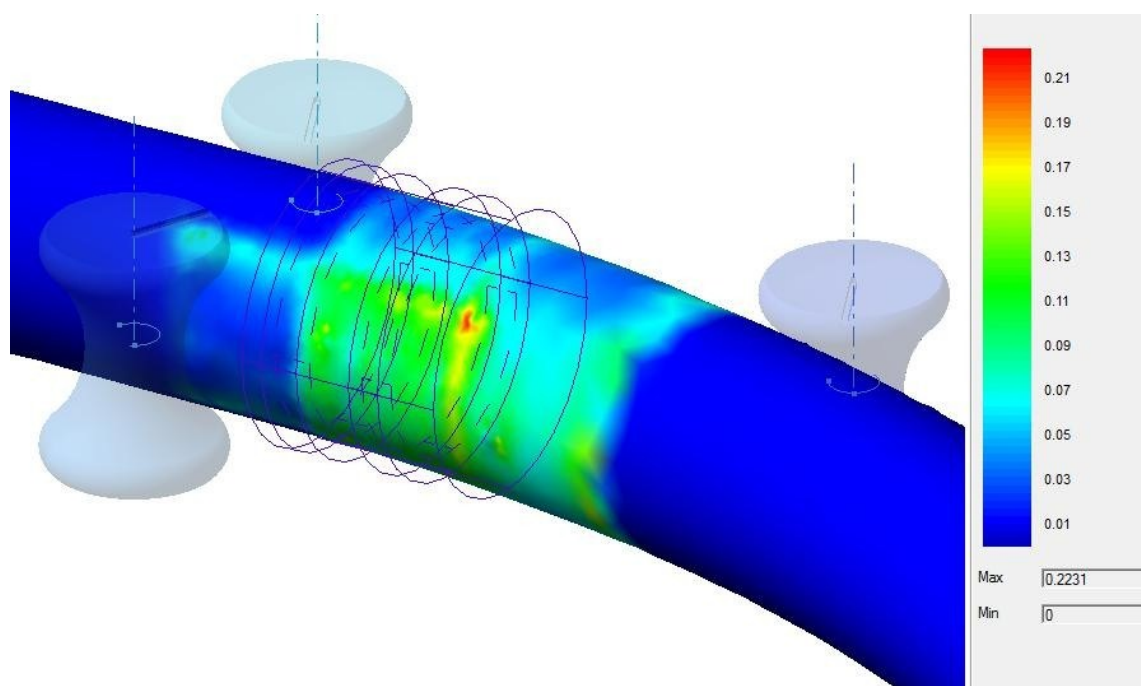
Obr. 20 Zasiťovanie modelu trubky

### 5.3 Efektivní deformace

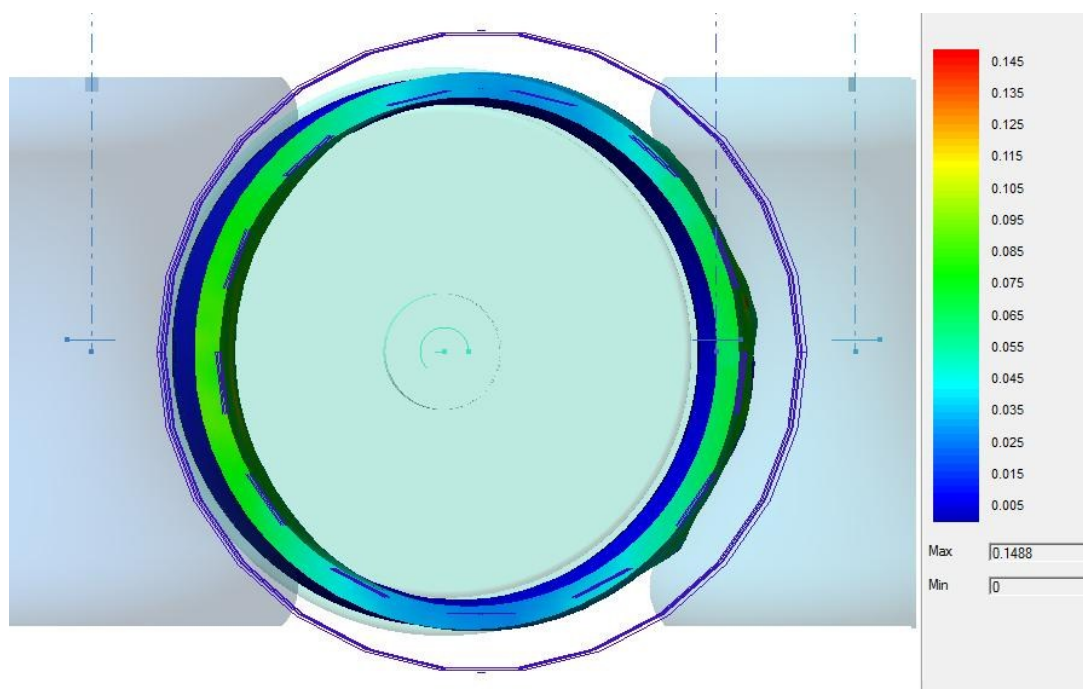
Pod pojmem deformace rozumíme změnu tvaru tělesa působením vnější síly na těleso. Měníme vzájemně polohy atomů. V následujících obrázcích tedy vidíme, v jakých částech trubky docházelo k největším deformacím v průběhu ohýbání. Deformace byly zaznamenány pro oba dva druhy ocelí.



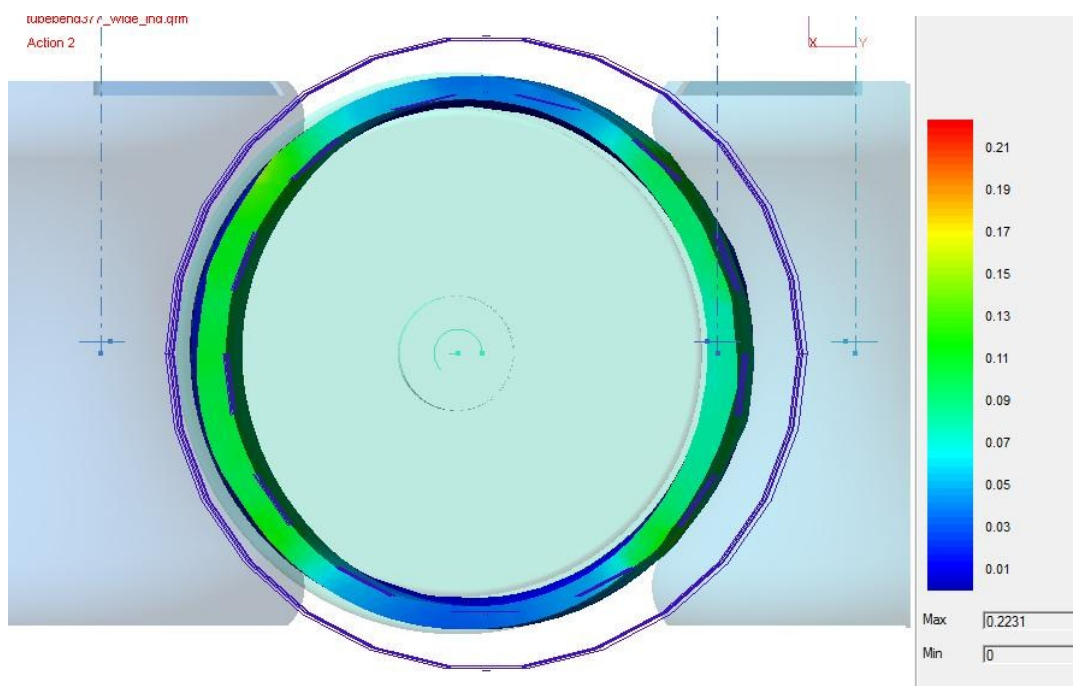
Obr. 21. deformace u oceli 11523



Obr. 22 Deformace u oceli 15128



Obr. 23 Deformační napětí u oceli 11523 - řez trubkou.



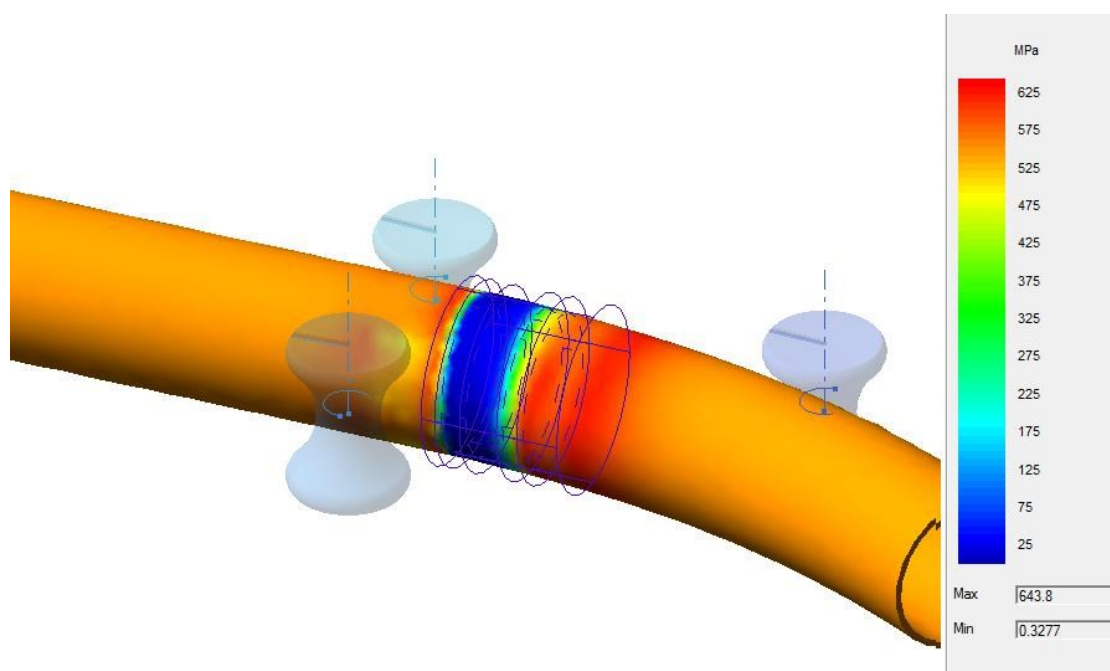
Obr. 24 Deformační napětí u oceli 15128 - řez trubkou.

Maximální deformace u materiálu 15128 bylo dosaženo 0,2231 MPa, u materiálu 11523 bylo dosaženo 0,1488 MPa. Z obrázku č. 23, č. 24 je patrné, že k největším

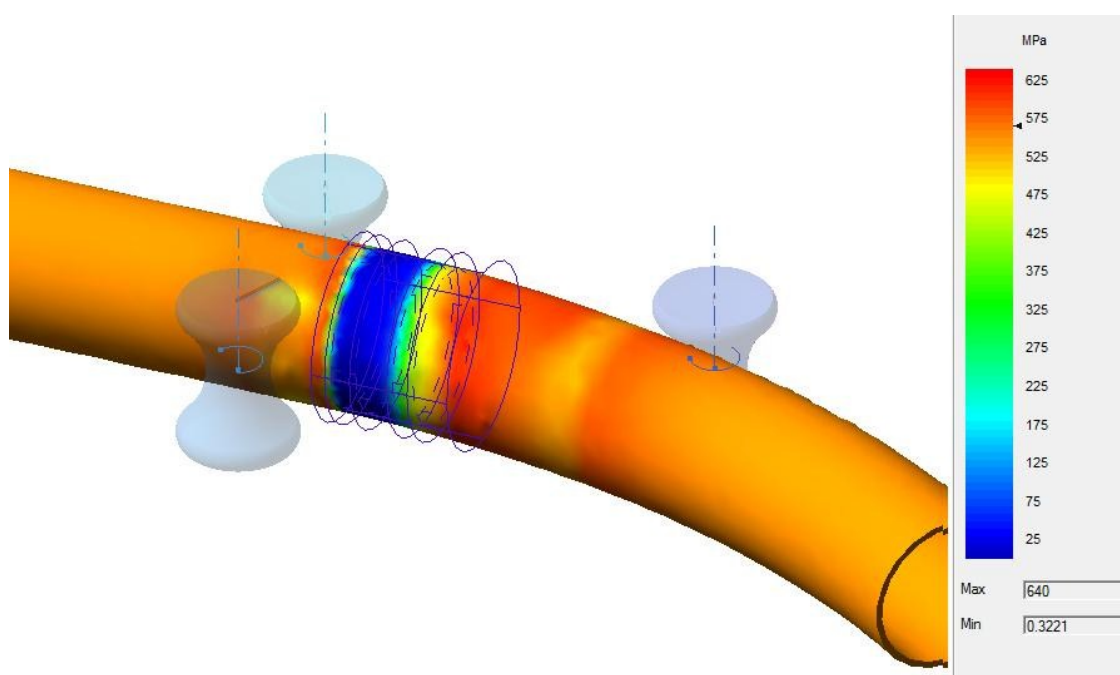
deformacím docházelo u nástroje číslo 3 (vodící kladka - nachází se u vnitřní části oblouku trubky), v místech, kde se nástroj dotýká trubky, tedy na jejím povrchu. Z měření vyplývá, že u obou materiálů nedošlo k velkým deformacím, které by způsobily vážnější (pro nás nepříznivou) změnu tvaru trubky. Rozložení deformací probíhalo u obou ocelových trubek podobně.



## 5.4 Přetvárný odpor



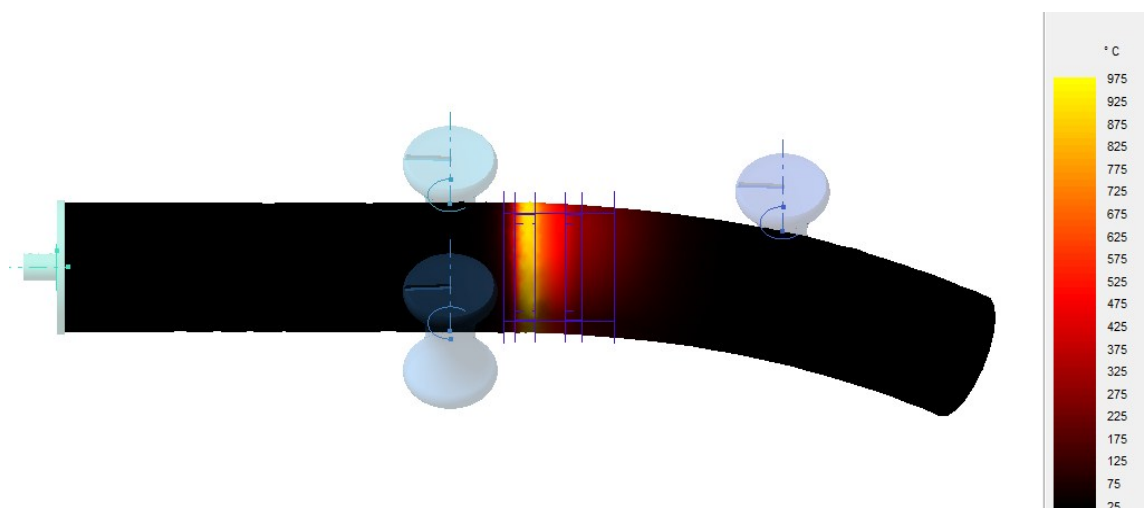
Obr. 25 Přetvárný odpor oceli 11523



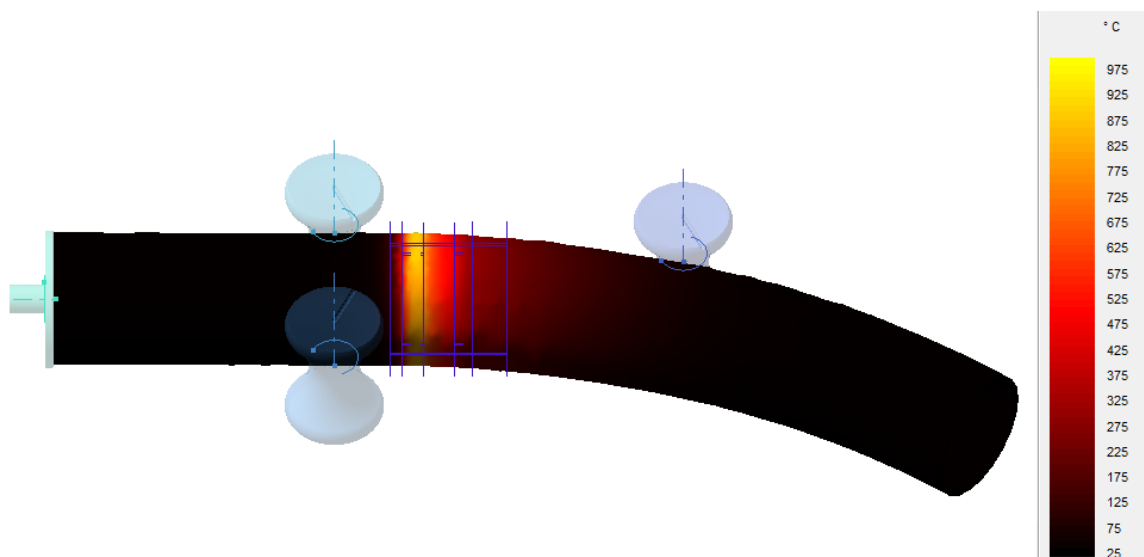
Obr. 26 Přetvárný odpor oceli 15128

Přetvárný odpor je u obou ocelí téměř stejný. Z obrázků č. 25, č. 26 vyplývá, že přetvárný odpor klesá v místě indukčního ohřevu a to dost zásadně.

## 5.5 Teploty v průběhu ohýbání



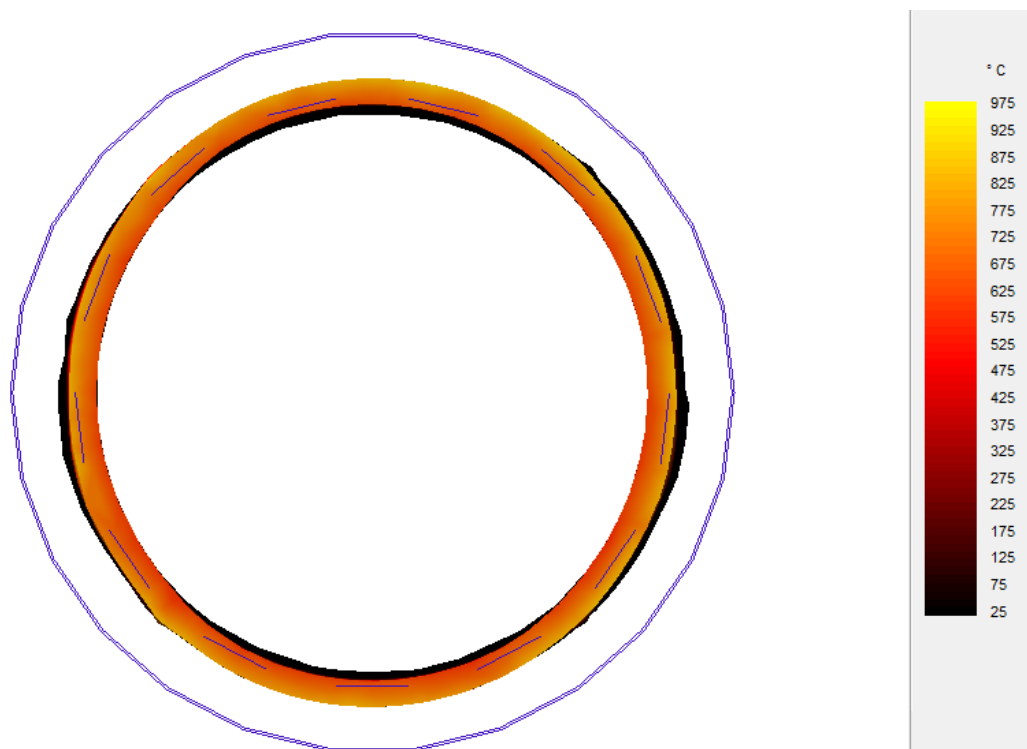
Obr. 27 Ohřev trubky 11523



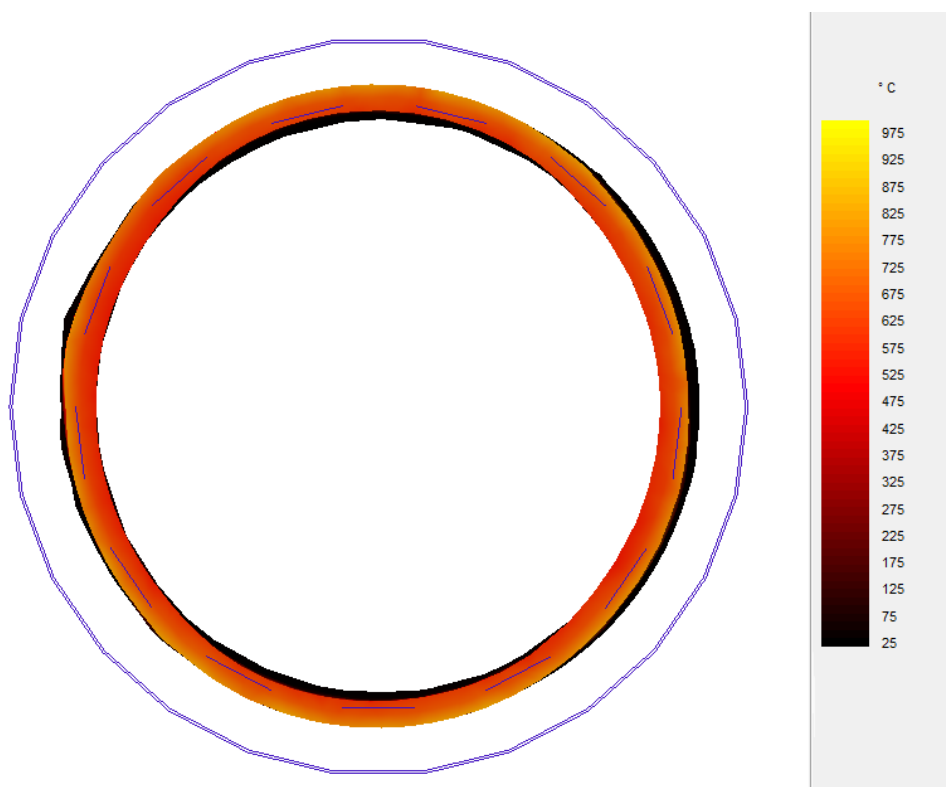
Obr. 28 Ohřev trubky 15128

Z obrázků č. 27, č. 28 vyplývá, že k ohřevu trubky docházelo v úzkém pásmu indukčního ohřevu.

U obou materiálů bylo dosaženo indukčním ohřevem stejných teplot, které dosahovaly na povrchu trubky až  $975^{\circ}\text{C}$  (induktor je umístěn na povrchu trubky). V průřezu trubky indukčního ohřevu však bylo dosaženo teplot nižších kolem dříve uvedených  $830^{\circ}\text{C}$ . Pásmo indukčního ohřevu se tedy musí ochlazovat kapalinou. Průběh ohřevu nejlépe uvidíme v řezu trubky.



Obr. 29 Ohřev oceli 11523- řez trubkou v indukčním pásmu ohřevu.



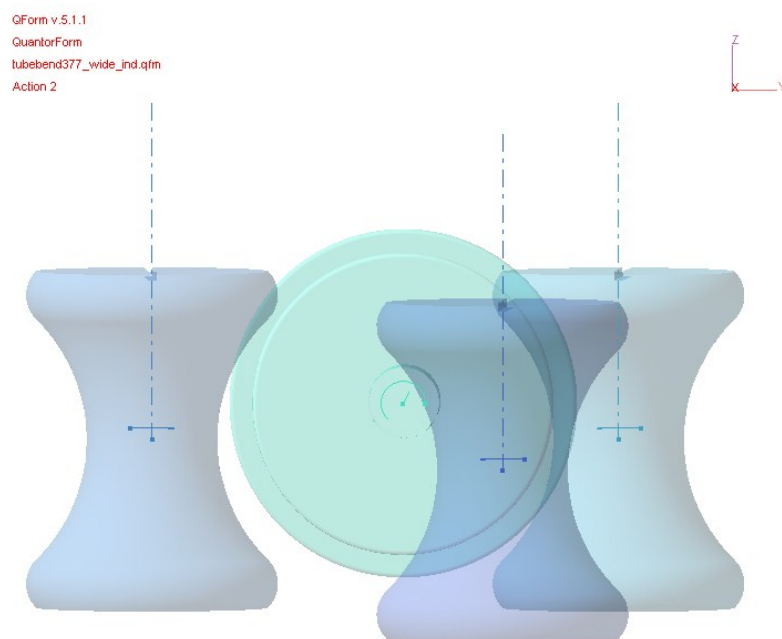
Obr. 30 Ohřev oceli 11523- řez trubkou v indukčním pásmu ohřevu.

Z obr. č. 29 a obr. č. 30 je patrné, že k ohřevu nedochází rovnoměrně v celém průřezu trubky, k nejvyšším teplotám došlo právě na povrchu trubky, který je největším nositelem žluté barvy (975 °C).

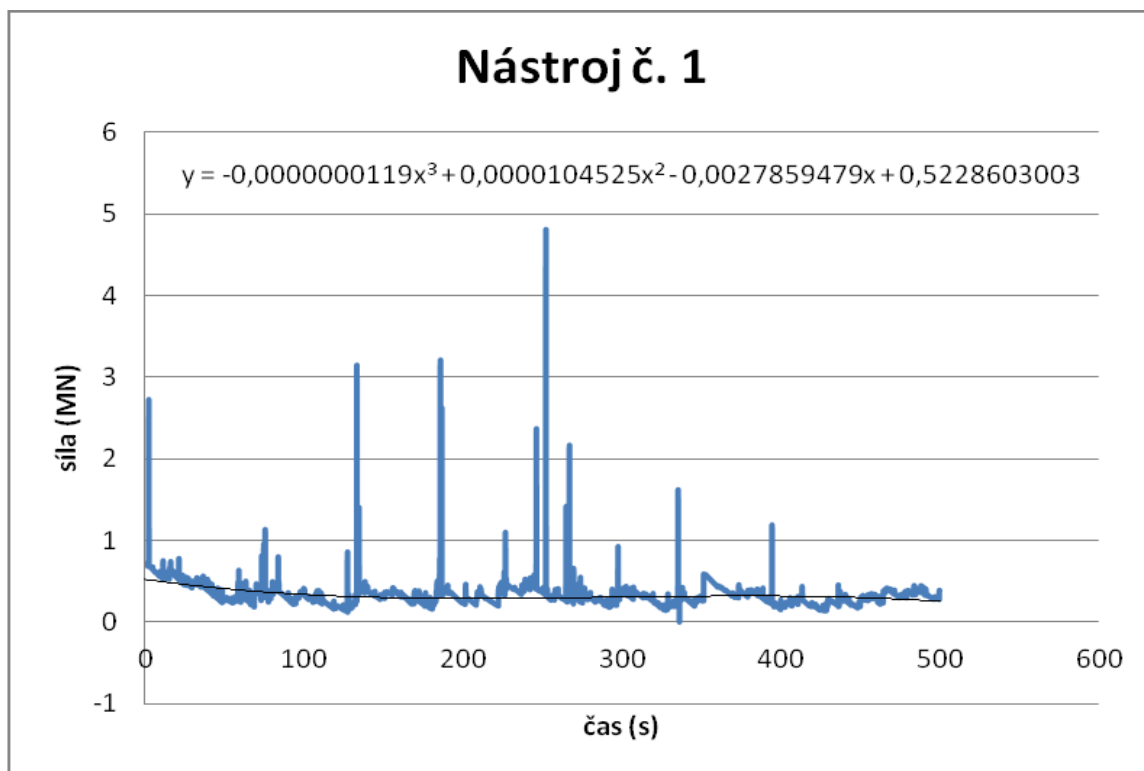
## 5.6 Síly na jednotlivých nástrojích

V následujících grafech vidíme síly, které byly vyvinuty na jednotlivých nástrojích respektive kladkách a tlačném zařízení pro oba dva materiály a to 11523 a 15128. Tyto síly byly zjištěny v programu Qform a následně zpracovány do grafů v Microsoft Excel, kde na vodorovné ose máme čas a svislé ose sílu. Graf byl následně proložen polynomem třetího řádu (v grafech označený černou barvou) a byla zobrazena rovnice regrese.

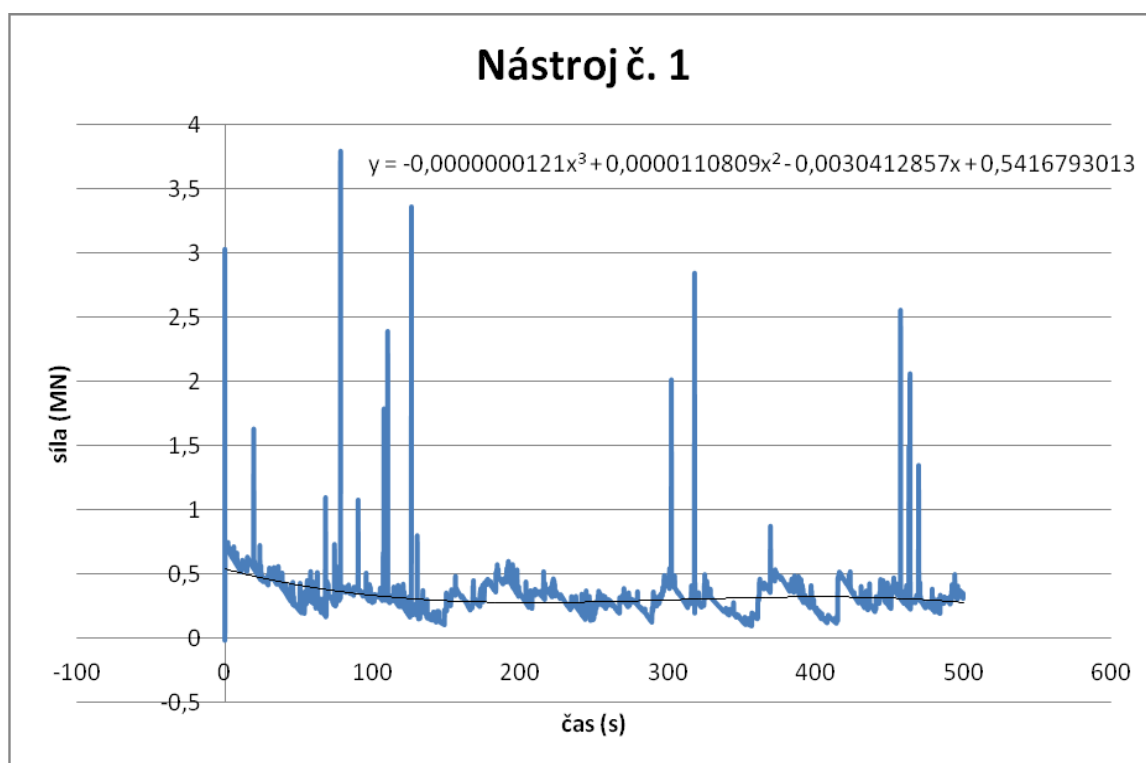
Jak už napovídá deformace na trubce, největší síly bylo dosaženo na nástroji číslo 3. Nebereme v úvahu náhlé výkyvy na nástrojích, ale při sledování polygonu jde vidět, že největší síly působily právě na nástroji číslo 3 (obr č. 36, č. 37) a to v celém jeho rozsahu a u obou druhů ocelí



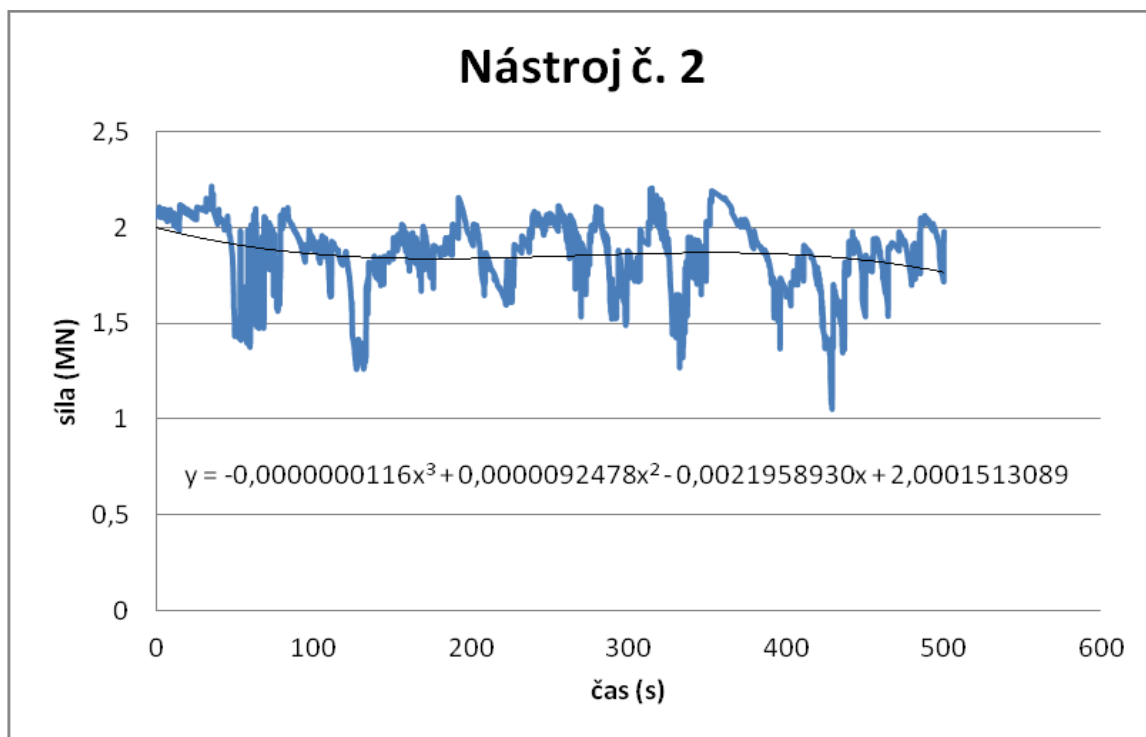
Obr. 31 Tvary nástrojů použitých pro ohyb trubky (kladky a tlačné zařízení).



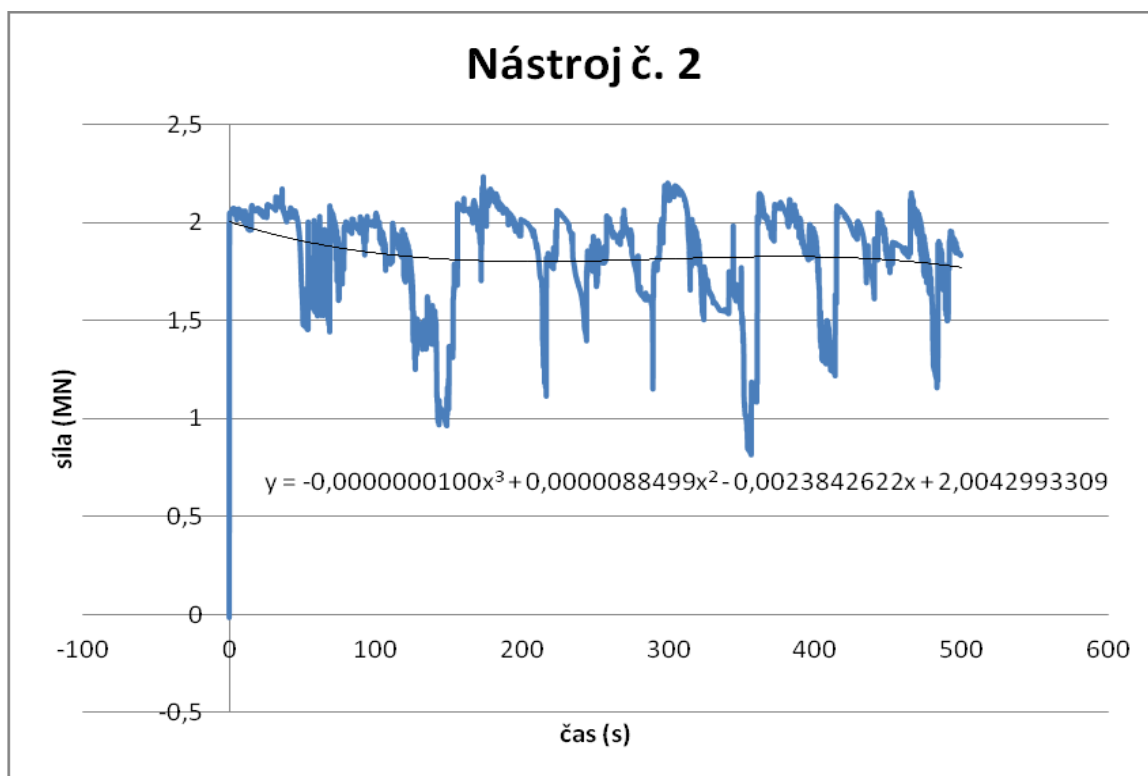
Obr. 32 Síla na nástroji č. 1 ocel 11523 (tlačné zařízení).



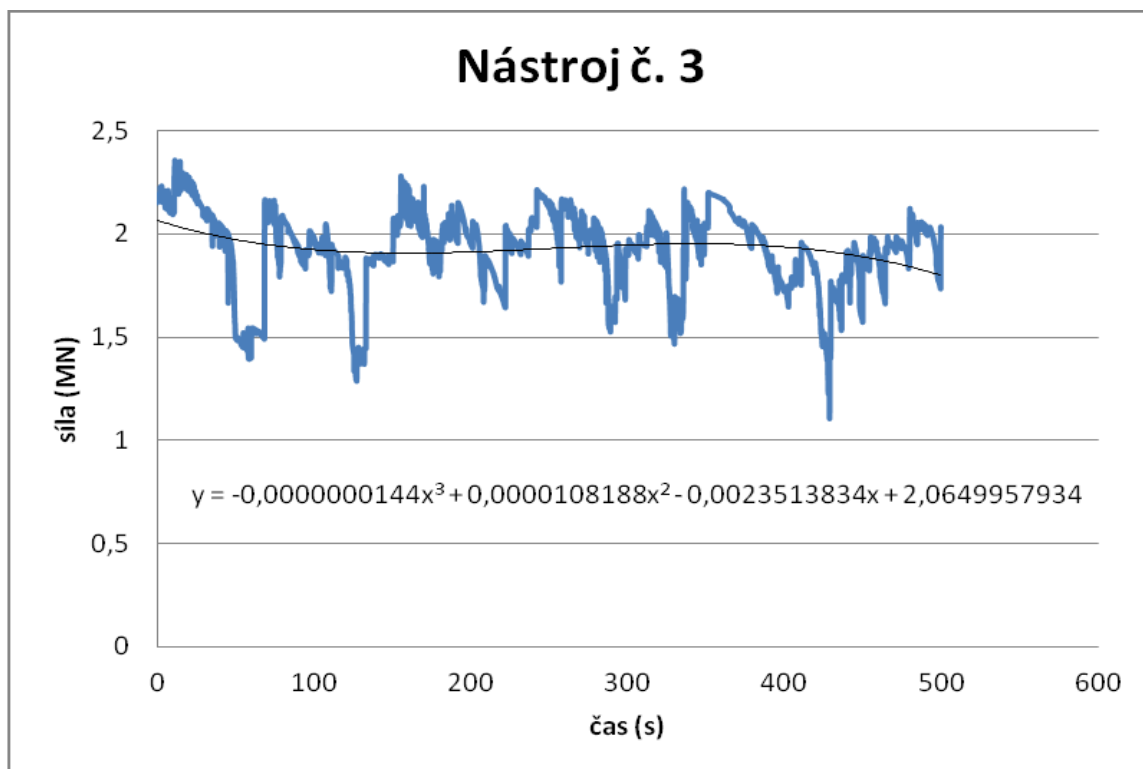
Obr. 33 Síla na nástroji č. 1 ocel 15128 (tlačné zařízení).



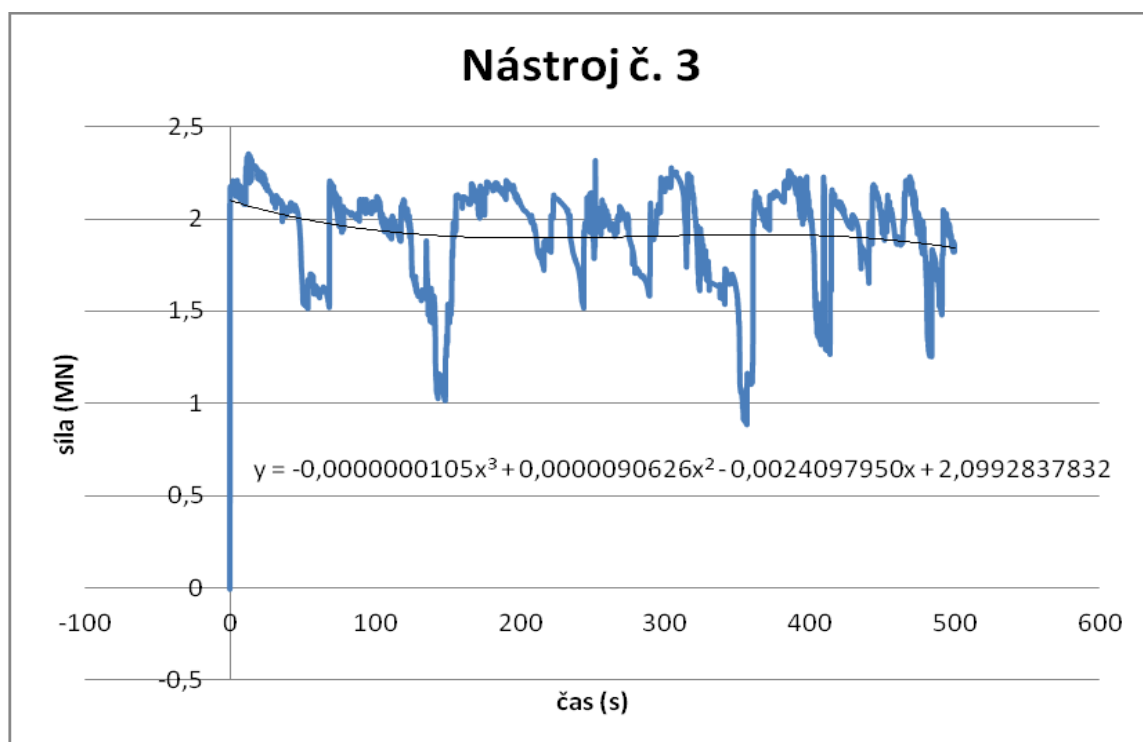
Obr. 34 Síla na nástroji č. 2 ocel 11523 (vodící kladka).



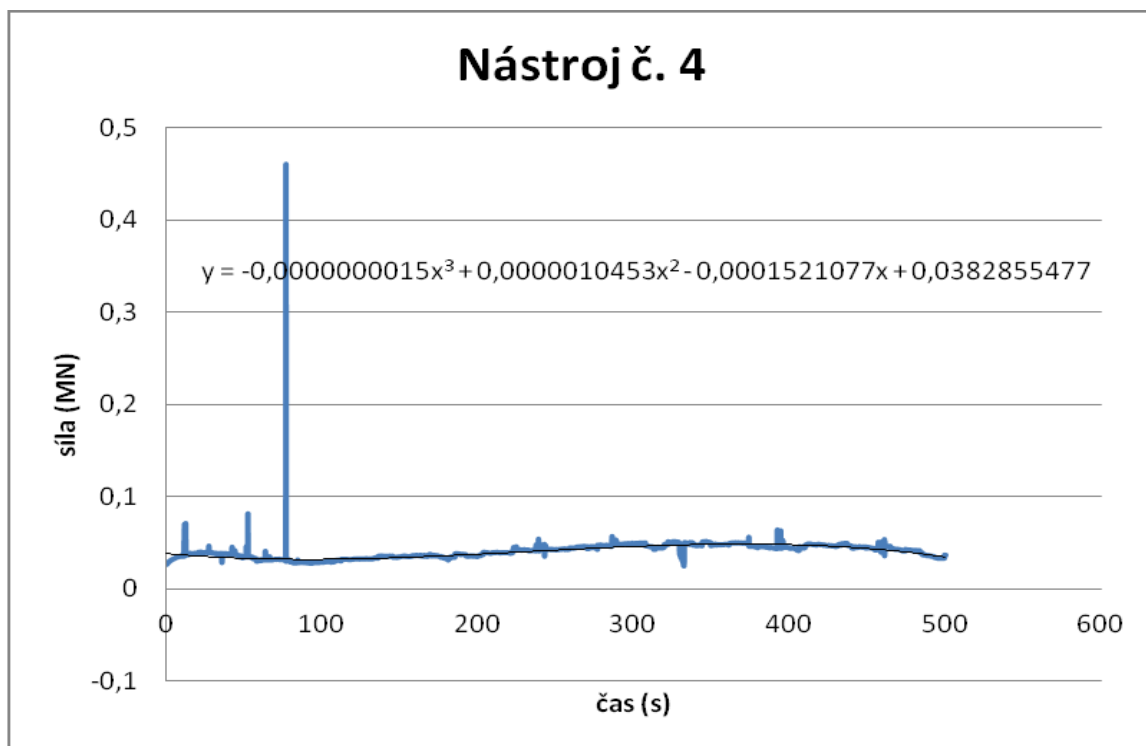
Obr. 35 Síla na nástroji č. 2 ocel 15128 (vodící kladka).



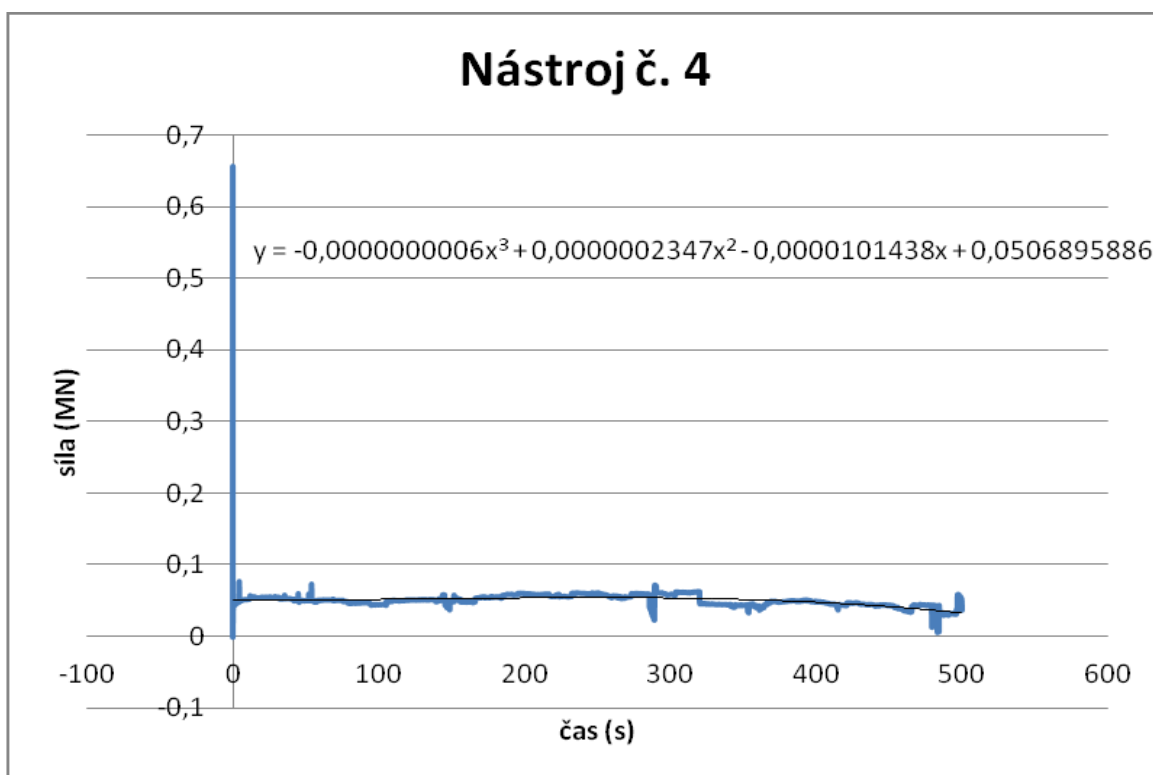
Obr. 36 Síla na nástroji č. 3 ocel 11523 (vodící kladka).



Obr. 37 Síla na nástroji č. 3 ocel 15128 (vodící kladka).



Obr. 38 Síla na nástroji č. 4 ocel 11523 (ohýbací kladka).



Obr. 39 Síla na nástroji č. 4 ocel 15128 (ohýbací kladka).



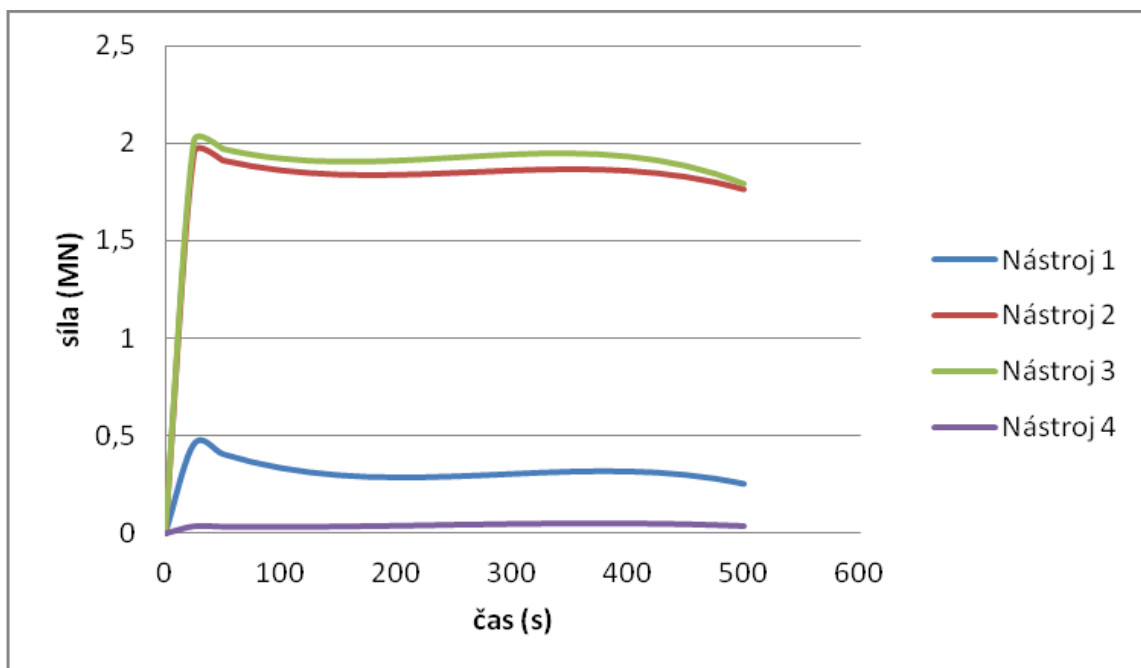
## 6. Diskuze dosažených výsledků

Pro zhodnocení dosažených výsledků byly zhotoveny srovnávací grafy sil pro ocel 11523 a 15128.

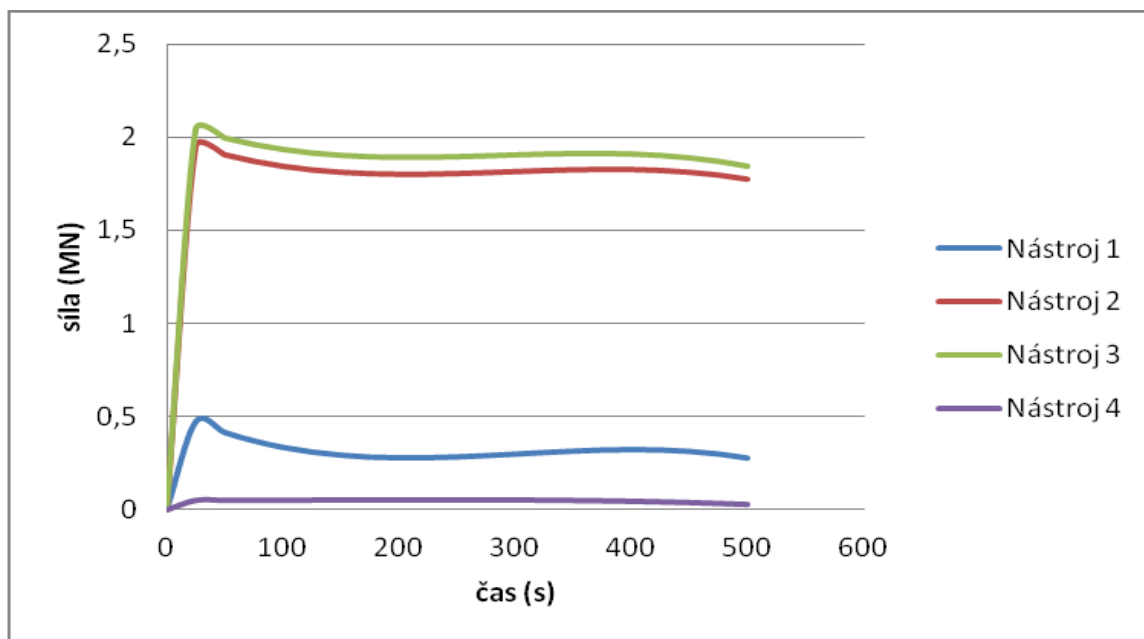
V předchozí kapitole byla pro každý nástroj vypočtena rovnice regrese, která je zobrazena v předchozích 8 grafech. Do rovnic byl dosazen za  $x$  čas (t), od nuly (s) do pětiset (s) a vyšly nám srovnávací grafy pro všechny čtyři nástroje. Vidíme tedy průběh času a síly, kterých bylo potřeba vynaložit v procesu ohýbání. Srovnání bylo provedeno pro obě oceli zvlášť.

Na srovnávacích grafech vidíme (obr č. 40 č. 41), že síly na jednotlivých nástrojích pro ohyb ocelových trubek jsou velice podobné pro oba druhy ocelí (11523, 15128), a to nejen svými max. hodnotami, ale i průběh sil v čase je téměř totožný. Z předchozího měření sil (obr č. 32-39) vidíme lépe, že síly pro ohyb ocele 15128 byly nepatrně větší. Je to však minimální rozdíl, který můžeme zanedbat. Oba materiálové reprezentanty si vedly tedy podobně a pro ohýbání trubek za tepla se podle mého hodí obě dvě stejně. Ocel 15128 bych doporučil tam, kde bude v praxi potřeba odolávat vysokým teplotám (ocel je žárupevná). Ocel 11523, která se také používá na energetická zařízení, je výhodnější svojí nižší cenou. Obě oceli jsou svařitelné, takže se budou hodit pro rozvody energetických zařízení. Mez pevnosti mají obě oceli totožný (obě mají max.  $R_m$  okolo 600 MPa). Mez kluzu ( $R_e$ ) má ale 15128 o něco výše, proto byly síly na nástrojích naměřeny o něco větší a deformace při ohybu na trubce také.

Dále pak z grafů vyplývá, že nejmenší síly působily na nástroj č. 4 (ohýbací kladka), pohybovaly se kolem nuly. Naopak největší síly působily, jak už bylo dříve zmíněno, na nástroj č. 3 (vodící kladka). Kdybychom tedy převedli ohýbání trubek do praxe, právě nástroj č. 3. by musel být nejvíce dimenzován.



Obr. 40 Srovnávací graf sil pro ocel 11523



Obr. 41 Srovnávací graf sil pro ocel 15128

## 7. Závěr

V úvodní kapitole je uvedeno, z jakých důvodů se volí ohýbání trubek za tepla. Jsou popsány druhy ohýbání trubek a dále blíže uvedeno ohýbání trubek za tepla. Dále jsou popsány vlastnosti materiálových reprezentantů a momenty potřebné k ohnutí trubky. Je zmíněno tváření za studena, tepla a poloohřevu. Byly sestaveny relace proměnných a upozornilo se na ztrátu kruhovitosti a jak se jí vyvarovat. Byly napsány vstupní parametry důležité pro nastavení ohýbacího stroje. Nechybí ani popis obou ocelí, které se budou ohýbat, jejich chemické složení, mechanické vlastnosti atd. Pro výpočet modelu trubky je použit počítačový program Qform 5.1. Díky němu byly zjištěny deformace způsobené při ohýbání u trubek z oceli (11523, 15128), teploty v indukčním pásmu ohřevu. Dále byly zjištěny síly na každém nástroji zvlášť, které jsou nezbytné pro ohyb. Výsledkem bylo sestavení grafů a porovnání sil všech čtyř nástrojů pro oba materiálové reprezentanty.

## 8. Seznam použité literatury

- [ 1 ] VÍTEK, A.. Ohýbání trubek. 1.vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966. 160 s.
- [ 2 ] ČADA, R.. Technologie. 1. 1.vyd. Ostrava: Technická univerzita Ostrava, 2009. 56 s. ISBN 978-80-248-2108-5
- [ 3 ] ČABELKA, J. a kol.. Mechanická technológia. Bratislava: VSAV, 1967. s. 594 – 599
- [ 4 ] HRUBÝ J. Limity ohýbání trubek ta tepla, dodatek 2000. Opava: Inženýrský servis, 2000
- [ 5 ] HRUBÝ J. Výpočet reakcí do kladek ohýbacího stroje. Opava: Technické zkoušky a analýzy
- [ 6 ] HRUBÝ J. Limity ohýbání trubek za tepla. Opava: Inženýrský servis, 2000
- [ 7 ] HRUBÝ J. Silové poměry při ohýbání trubek v kladkové ohýbačce. Opava: Inženýrský servis, 1997
- [ 8 ] Technická univerzita Liberec, fakulta strojní, katedra strojírenské technologie, oddělení tváření kovů a plastů. Technologie plošného tváření. [online]. 13.4.2012 dostupné z [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/07.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/07.htm)
- [ 9 ] QuantorForm: QForm 3D - major areas of application and features. [online].[cit.2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.qform3d.com/?go=20>
- [10] Modřany Power: Ohyby. [online].[cit.2012-05-12]. Dostupné z: [http://www.modrany.cz/Ohyby\\_1.html](http://www.modrany.cz/Ohyby_1.html)
- [11] Rajmont s.r.o.: Indukční ohřev. [online].[cit.2012-05-11]. Dostupné z: <http://www.rajmont.cz/produkty-indukcni-ohrev/>
- [ 12 ] SCHWARZ, D. – KOUKAL, J. – SONDEL, M.: Ověření vlastností svarového spoje ocelí P91 a 15128 po dlouhodobé teplotní expozici. Konstrukce. Odborný časopis pro strojírenství a stavebnictví, 2010 [online].[cit.2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/overeni-vlastnosti-svaroveho-spoje-oceli-p91-a-15128-po-dlouhodobem-teplotni-expozici/>
- [ 13 ] Feron a.s : Sortimentní katalog. [online].[cit.2012-05-16]. Dostupné z: [http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat\\_normy.php](http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat_normy.php)
- [ 14 ] VERNER R.: Dodávky vysokotlakého spojovacího potrubí. All for power, 03/2009 , [www.allforpower.cz](http://www.allforpower.cz)
- [15] Lentus spol. s r.o.: 11523.1. [online]. 16.5.2012 dostupné z: <http://www.lentus-ocel.cz/tridy-oceli/115231-nelegovana-konstrukcni-ocel.htm>

[16] Numerické simulace: Metoda konečných prvků. [online].[cit.2012-05-16]. Dostupné z : <http://wood.mendelu.cz/cz/sections/FEM/?q=node/32>

[17] Technická univerzita Liberec, fakulta strojní, katedra strojírenské technologie, oddělení tváření kovů a plastů. Technologie tváření kovů. [online].[cit.2012-04-13]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/01.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm)

[18] KELČA, M.: Ohýbačky a ohýbání měděných trubek. [online].[cit.2012-04-13]. Dostupné z: <http://www.medportal.cz/aktuality/trubky-v-tzb/ohybacky-ohybani-medenych-trubek>

## **Poděkování**

**Děkuji prof. Ing. Jiřímu Hrubému, CSc. za připomínky a cenné informace k řešení problematice diplomové práce.**